



POSGRADOS

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCION SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

RPC-SO-30-NO.508-2019

OPCIÓN DE TITULACIÓN:
PROYECTO DE DESARROLLO

TEMA:
DISEÑO ÓPTIMO DE UN SISTEMA DE
ILUMINACIÓN EXTERIOR DENTRO DE UNA
PLATAFORMA PETROLERA CONSIDERANDO
DECISIÓN MULTICRITERIO

AUTOR(ES)
ANDRÉS MAURICIO VELA VELASCO

DIRECTOR:
ALEXANDER AGUILA TÉLLEZ

QUITO – ECUADOR
2024



Autor:



Andrés Mauricio Vela Velasco

Ingeniero Electrónico en Automatización y Control
Candidato a Magíster en Electricidad, Mención Sistemas
Eléctricos de Potencia.

Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito

avelav@est.ups.edu.ec

andresvmauro@gmail.com

Director:



Alexander Aguila Téllez

Ingeniero Eléctrico

Magister en Ingeniería

aaguila@est.ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2024 Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO – ECUADOR – SUDAMÉRICA

ANDRÉS MAURICIO VELA VELASCO.

Diseño óptimo de un sistema de iluminación exterior dentro de una plataforma petrolera considerando decisión multicriterio.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por tenerme siempre bajo su bendición, él guía mis pasos, me dirige hacia donde debo ir y yo tengo las fuerzas de seguir el camino.

Gaby, gracias por ser el soporte de nuestra familia y cuidar de nuestros hijos mientras yo debía ir a clases, tu apoyo y esfuerzo me permiten ser mejor persona cada día y crecer a tu lado.

Oswaldo y Myriam, con sus consejos y cuidados me enseñaron a enfrentar el mundo y saber que cada obstáculo que se presenta en el camino se lo puede pasar si se tienen las herramientas necesarias para hacerlo, gracias a ustedes soy el padre y profesional que conocen ahora, gracias Padres.

Índice general

Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	7
Abstract	9
1. Introducción	11
1.1. Antecedentes	11
1.2. Descripción general del problema	11
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
1.4. Contribuciones	12
1.5. Organización del manuscrito	13
2. Marco teórico referencial	14
2.1. Introducción	14
2.2. Sistemas de iluminación dentro de plataformas petroleras	14
2.2.1. Normativas y estándares aplicables	14
2.2.2. Tipos de luminarias a utilizar en plantas petroleras	15
2.2.3. Tipos de instalación	16
2.2.4. Parámetros importantes dentro de un sistema de iluminación exterior	18
2.3. Métodos de optimización multicriterio	20
2.3.1. Conceptos de la metodología multicriterio	21
2.3.2. Clasificación de la metodología multicriterio	21
2.3.3. Método Ponderado Normalizado (MPN)	22
2.3.4. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	25

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	4
2.3.5. 2.2.5. Encuesta a expertos para definir ponderaciones . . .	30
3. Metodología propuesta	33
3.1. Introducción	33
3.2. Definición y análisis de criterios	35
3.3. Elaboración de encuestas	36
3.4. Definición de alternativas	41
3.5. Aplicación del método Ponderado Normalizado (MPN)	42
3.6. Aplicación del método Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	45
3.7. Simulación de resultados	54
4. Análisis de resultados	59
5. Conclusiones	66
6. Glosario	68
Glosario	68
Referencias	69

Índice de Figuras

2.1. Iluminación exterior instalada en poste. Fuente Autor	17
2.2. Iluminación exterior instalada bajo cubierta. Fuente Autor	18
2.3. Esquema jerárquico AHP. Fuente Autor	26
3.1. Metodología de trabajo	34
3.2. Cantidad de expertos vs área de experiencia. Fuente Autor	37
3.3. Cantidad de expertos vs años de experiencia. Fuente Autor	37
3.4. Tendencia respuestas Expertos encuesta “A”. Fuente Autor	38
3.5. Diagrama de Pareto análisis de datos encuesta “A”. Fuente Autor	39
3.6. Diagrama de Pareto análisis de datos encuesta “B”. Fuente Autor	41
3.7. Resultados MPN. Fuente Autor	45
3.8. Esquema jerárquico caso de estudio. Fuente Autor	46
3.9. Resultado Proceso Analítico Jerárquico AHP. Fuente Autor	54
3.10. Simulación alternativa 3 Método Ponderado Normalizado. Fuente Autor	55
3.11. Simulación alternativa 3 Método Ponderado Normalizado – Colores Falsos. Fuente Autor	56
3.12. Simulación alternativa 2 Proceso Analítico Jerárquico. Fuente Autor	57
3.13. Simulación alternativa 2 Proceso Analítico Jerárquico – Colores Falsos. Fuente Autor	58
4.1. Comparación de ponderaciones de criterios entre métodos de optimización. Fuente Autor	60
4.2. Comparación de ponderaciones de alternativas entre métodos de optimización. Fuente Autor	61
4.3. Nivel de iluminación promedio resultados obtenidos. Fuente Autor	62
4.4. Cantidad de postes instalados, de acuerdo con la simulación. Fuente Autor	63

ÍNDICE DE FIGURAS

6

4.5. Número de luminarias instaladas en simulaciones. Fuente Autor .	63
4.6. Costo global de instalación para cada alternativa. Fuente Autor . .	64
4.7. Potencia total consumida. Fuente Autor	65

Índice de Tablas

2.1. Niveles de iluminación recomendados API RP-540	15
2.2. Comparativa luminarias HPS y LED	16
2.3. Conceptos metodología multicriterio	21
2.4. Escala de importancia relativa	27
2.5. Valores Índice aleatorio	29
2.6. Porcentajes máximos de CR	30
2.7. Ejemplo de Encuesta 1	30
2.8. Encuesta aplicación método AHP	32
3.1. Separación de criterios para elaboración de métodos	35
3.2. Encuesta tipo A para orden de criterios	36
3.3. Análisis de datos encuesta “A”	39
3.4. Datos obtenidos encuesta “B”	40
3.5. Definición de alternativas	42
3.6. Ponderación y pesos de criterios MPN	43
3.7. Matriz de Máximos, Mínimos y Recorrido	43
3.8. Reglas para normalizar valores de criterios	44
3.9. Desarrollo del MPN	44
3.10. Matriz normalizada	47
3.11. Vector prioridad y Coeficiente de Congruencia	47
3.12. Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Encendido / Apagado	48
3.13. Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Color de luz	49
3.14. Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Vida útil	49
3.15. Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Costo	50

<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	8
3.16.Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Clasificación de luminaria	50
3.17.Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Flujo luminoso	51
3.18.Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Mantenimiento	51
3.19.Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Distancia entre postes	52
3.20.Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Diseño de luminaria	52
3.21.Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Potencia consumida	53
3.22.Desarrollo del AHP	53

Resumen

En la actualidad los sistemas de iluminación dentro de la mayoría de las plataformas petroleras en el Ecuador se encuentran en un punto de desequilibrio tanto por la combinación de tecnologías como por modernidad. A primera instancia se busca la actualización de las típicas luminarias HID o HPS que se han usado por varios años como estándar dentro de estas facilidades, por su opción en LED, de acuerdo a las áreas donde se instalarán se deberá considerar lámpara a ser utilizada.

La planificación del diseño de sistemas de iluminación tomará en cuenta todos los datos obtenidos del estudio del arte, así como las recomendaciones indicadas en las normativas internacionales para este tipo de instalaciones, se definirán las principales variables que se deben tomar en cuenta para generar un criterio de optimización, así como las restricciones que deberá tener el sistema de iluminación. Con esta planificación se tendrá un panorama más claro al momento de considerar las decisiones multicriterio a utilizar.

La evaluación del sistema se lo realizará mediante software adecuado en los cuales se procesarán toda información obtenida en las decisiones multicriterio y se presentará un caso de estudio para evaluar la eficiencia del sistema de iluminación dentro de una plataforma petrolera. Se procederá a realizar simulaciones para comparar resultados y generar conclusiones del proceso de optimización.

Abstract

Currently, the lighting systems in most of the oil platforms in Ecuador are at a point of imbalance in terms of both the combination of technologies and modernity. In the first instance we are looking for the update of the typical HID or HPS luminaires that have been used for several years as standard in these facilities, for its option in LED, according to the areas where they will be installed should be considered lamp to be used.

The planning of the lighting system design will consider all the data obtained from the study of the art, as well as the recommendations indicated in the international standards for this type of installations, the main variables that must be considered to generate an optimization criterion will be defined, as well as the restrictions that the lighting system must have. With this planning we will have a clearer picture at the moment of considering the multi-criteria decisions to be used.

The evaluation of the system will be carried out by means of appropriate software in which all the information obtained in the multi-criteria decisions will be processed and a case study will be presented to evaluate the efficiency of the lighting system within an oil platform. Simulations will be performed to compare results and generate conclusions of the optimization process .

Capítulo 1

Introducción

Los trabajos dentro de una plataforma petrolera se los realizan durante las 24 horas del día, por eso es de gran importancia realizar una optimización a los sistemas de iluminación actuales considerando parámetros como suficiente claridad y visibilidad, tipo de luminaria a utilizar, protección contra explosiones de acuerdo con el área donde se instalarán las luminarias, reducción de costo, tiempo de vida útil de la lámpara, mantenimiento y tecnología.

1.1. Antecedentes

En la actualidad los sistemas de iluminación dentro de plataformas petroleras han sufrido grandes cambios, la actualización de los sistemas de iluminación no han ido a la par de la tecnología, es por esto que se encuentran sistemas de iluminación con problemas, lámparas que no funcionan, sistemas caducos y sin repuestos, incluso en algunas plataformas se encuentran sistemas que presentan diferentes tipos de luminarias causando una contaminación lumínica que puede llegar a afectar el desarrollo de los trabajos nocturnos de la plataforma.

1.2. Descripción general del problema

Teniendo en cuenta los principales criterios de optimización que intervienen normalmente en el diseño de los sistemas de iluminación se considera plantear, diseñar y desarrollar un modelo matemático de optimización multicriterio que abarque estos parámetros y las posibles afectaciones entre ellos

para así conseguir un sistema de iluminación óptimo para el tipo de trabajos que se desarrollaran dentro de la plataforma petrolera..

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de iluminación exterior dentro de plataformas petroleras considerando decisión multicriterio, consiguiendo un equilibrio entre los principales parámetros de diseño del sistema.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Analizar el estado del arte sobre los sistemas de iluminación actuales dentro de plataformas petroleras, considerando normativas y estándares internacionales, así como documentos científicos, estableciendo de esta manera los parámetros principales y la metodología de desarrollo de la investigación.
2. Planificar el diseño de sistemas de iluminación tomando en cuenta los principales parámetros que afectan en el desempeño del sistema, delimitando las posibles variables de estado, así como criterios.
3. Establecer las decisiones multicriterio mediante la determinación de la función objetivo, criterios y alternativas, definiendo así un procedimiento de resolución que permita la evaluación del modelo propuesto.

1.4. Contribuciones

Como contribución dentro del presente estudio, se advierte una optimización con respecto a los sistemas actualmente utilizados para los sistemas de iluminación exterior de una plataforma petrolera, la cual podrá ser escalable y considerará los principales aspectos que afectan a este tipo de sistemas, todos los parámetros serán considerados en el Marco Teórico para su mejor entendimiento y esto permita reducir los costos por la cantidad de recursos empleados

1.5. Organización del manuscrito

El manuscrito de este trabajo ha sido organizado como sigue:

El capítulo 1 presenta la descripción del problema y objetivos de este trabajo. El capítulo 2 presenta el desarrollo del marco teórico. En el capítulo 3 se describe la metodología a seguir dentro del presente caso de estudio, considera la realización de encuestas, la definición de las alternativas a ser comparadas y el desarrollo de los dos métodos de optimización considerados dentro del presente estudio. El capítulo 4 realiza un análisis de los resultados obtenidos con la aplicación de los métodos de optimización y determina las alternativas que fueron definidas como optimizadas dentro de cada método. Finalmente el capítulo 5 concluye este trabajo.

Capítulo 2

Marco teórico referencial

2.1. Introducción

En este capítulo se describe el estado del arte de los principales parámetros que intervienen en el diseño de un sistema de iluminación exterior dentro de plataformas petroleras, así como los métodos de optimización que serán usados en el presente estudio. Se describen las principales normativas y estándares internacionales que presentan recomendaciones para el diseño de sistemas de iluminación, los tipos de luminarias utilizadas dentro de las estaciones petroleras y los parámetros importantes a tomar en cuenta para la definición de restricciones dentro del proceso de optimización. Este trabajo se centrará en el uso de metodologías de optimización, estas serán descritos y analizadas para su aplicación en los siguientes capítulos de este proyecto.

2.2. Sistemas de iluminación dentro de plataformas petroleras

2.2.1. Normativas y estándares aplicables

Los sistemas de iluminación dentro de plataformas petroleras esta delimitados de acuerdo con las recomendaciones que se indican en las siguientes normativas:

- NFPA 70 National Electrical Code.

2.2. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DENTRO DE PLATAFORMAS PETROLERAS 15

- API RP-540 Electrical Installations in Petroleum Processing Plant.

En estos documentos se muestran los principales parámetros a tomar en cuenta en el diseño de un sistema de iluminación dentro de plataformas petroleras.

La normativa API RP-540 [1] señala prácticas recomendadas para trabajos dentro de una plataforma petrolera, en el capítulo 7 se identifican los principales temas que se deben tomar en cuenta al momento del diseño e instalación de sistemas de iluminación. Dentro de los puntos a resaltar de la norma están los niveles de iluminación recomendados de acuerdo con cada área de trabajo dentro de una plataforma petrolera, aquí se consideran áreas administrativas, de trabajos especiales, áreas de carga y descarga, plataformas Offshore, y áreas generales. . En la Tabla 2.1 se muestra un extracto de lo indicado en la norma.

Tabla 2.1: Niveles de iluminación recomendados API RP-540

Area or Activity	Maintained		Elevation		
	Horizontal Illuminance (unless noted)		Location	Millimeters	Inches
	Lux	Footcandles			
Process Areas					
General process units					
Pump rows, valves, manifolds	50	5	Ground		
Maintenance platforms	10	1	Floor		
Operating platforms	50	5	Floor		
Cooling towers (equipment areas)	50	5	Ground		
General area	10	1	Ground		
Control rooms and houses					
Ordinary control house	300	30	Floor		

La normativa también señala recomendaciones a tomar en cuenta para la selección de la luminaria, estándares de manufactura, consideraciones de tecnología a utilizar, instalación de estas dentro de áreas clasificadas y Calidad de iluminación. Todos estos parámetros deben ser tomados en cuenta al momento de diseñar un sistema dentro de plantas petroleras.

2.2.2. Tipos de luminarias a utilizar en plantas petroleras

Al tratar el tema de luminarias dentro de una plataforma petrolera existen varios criterios que se han tomado en cuenta al momento del diseño y la instalación de este tipo de sistemas, por ejemplo, si consideramos una plataforma

2.2. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DENTRO DE PLATAFORMAS PETROLERAS¹⁶

que tiene ya varios años en operación fácilmente vamos a encontrar luminarias tipo HPS (*High-pressure sodium lamps*) las mismas que fueron adoptadas debido a su tiempo de vida útil, y el tipo de carcasa apta para instalación dentro de áreas clasificadas, explosivas o industriales. Así también, si consideramos plataformas relativamente nuevas se puede observar sistema de iluminación conformado por luminarias LED y HPS, esto debido a que la tecnología LED ha sido más accesible en el país, pero al ser costosas no se sustituyen las luminarias instaladas, sino que se van cambiando de poco en poco, afectando así a la calidad de iluminación que se entrega dentro de la planta.

Adicional uno de los criterios más importantes dentro de una plataforma petrolera es el nivel de protección que presenta la luminaria, teniendo así que, si se instalan luminarias en áreas conocidas como clasificadas, donde pueden existir presencia de gases, se debe considerar la protección contra explosiones certificada por el fabricante.

Si bien, existen otras tecnologías para sistemas de iluminación como Fluorescente, HID o Halógena, dentro de una plataforma petrolera se considera la utilización de luminarias HID o actualmente LED para la iluminación exterior, de áreas generales y de equipos, debido a sus características industriales. En la Tabla 2.2 se muestra una comparativa de pros y contras de utilizar luminarias HPS o LED.

Tabla 2.2: Comparativa luminarias HPS y LED

Tipo	Puntos positivos	Puntos negativos	Datos Técnicos
HPS	Costo inicial menor	Costo de mantenimiento alto	Vida útil: 10000 a 24000 horas
	Se encuentran normadas	Produce calor	Eficiencia: 80 a 140 Lm/W
	De mayor potencia	Contiene 6 mg de mercurio por cada 100W	Índice CRI: 20 a 30
	Mayor dirección de luz, casi 360°	Menor vida útil	Temperatura de color: 2200K
Led	Produce igual calor que luces HPS	Mayor costo inicial	Vida útil : 25000 a 200000 horas
	No genera calor	No se encuentran normalizadas	Eficiencia: 114 a 160 Lm/W
	Bajo consumo de potencia	Corta dirección de luz, aprox 180°	Índice CRI: 65 a 95
	Mayor vida util	Calidad varia entre marcas	Temperatura de color: 2200K a 6000K

2.2.3. Tipos de instalación

Los sistemas de iluminación exterior, dentro de plataformas petroleras son de vital importancia ya que los trabajos se los realizan 24 horas al día, por esto la ubicación y tipo de instalación de las luminarias toma una gran importancia. En el capítulo 2.3.3 de la tesis doctoral [2] se identifican los principales tipos

2.2. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DENTRO DE PLATAFORMAS PETROLERAS¹⁷

de soportes para luminarias en varios ambientes, sin embargo, para plantas petroleras se ha estandarizado dos tipos de instalaciones principalmente:

- Al tratarse de un sistema de iluminación exterior o general se opta por la instalación de postes metálicos abatibles de 11 metros de altura, los cuales tienen accesorios de soporte para instalar 2 o tres luminarias tipo reflector, como se puede ver en la Figura 2.1 .



Figura 2.1: Iluminación exterior instalada en poste. Fuente Autor

- Para la iluminación de cubiertas abiertas, en las cuales se instalan equipos eléctricos o de procesos, se considera el uso de luminarias tipo "Pendant mount" las cuales son tipo bahía alta con instalación tipo colgante a los techos de las estructuras, como se puede ver en la Figura 2.2.

2.2. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DENTRO DE PLATAFORMAS PETROLERAS¹⁸



Figura 2.2: Iluminación exterior instalada bajo cubierta. Fuente Autor

Si bien, dentro de una plataforma petrolera existen más tipos de instalación de luminarias como en tanques o en mástiles, los principales y más utilizados métodos de instalación son los nombrados anteriormente.

2.2.4. Parámetros importantes dentro de un sistema de iluminación exterior

Existen libros y artículos que tratan sobre los principales parámetros que se debe tomar en cuenta al momento de diseñar un sistema de alumbrado público [3], [4], [5], realizando una comparación y determinación de los principales parámetros que influyen en un sistema de iluminación se pueden enumerar los siguientes:

- **Encendido / Apagado:** Este parámetro define la rapidez con la que la luminaria responde a encenderse o apagarse.
- **Color de luz:** Mide la temperatura de la iluminación, que tan cálida o fría es. Se la mide en Kelvin (K).
- **Eficiencia:** Considera la capacidad de entregar más brillo por menos potencia consumida, se lo mide en lúmenes por vatio.
- **Vida útil:** Parámetro que mide la cantidad de horas que puede funcionar la luminaria.
- **Costo:** Considera el valor de adquisición inicial de las luminarias.

2.2. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN DENTRO DE PLATAFORMAS PETROLERAS¹⁹

- **Clasificación de luminaria:** Considera los requerimientos necesarios para el área donde va a ser instalada la luminaria, si se trata de áreas clasificadas o no.
- **Flujo luminoso:** Considera el flujo luminoso que entrega la luminaria, se lo mide en lúmenes.
- **Nivel de iluminación:** Considera la cantidad de lúmenes que se reflejan sobre una superficie, se lo mide en Luxes.
- **Tipo de postes:** Considera la configuración de las luminarias instaladas en un poste.
- **Distancia entre postes/luminarias:** Considera la distancia que se considera entre postes de iluminación o entre luminarias instaladas bajo cubierta.
- **Inclinación de luminarias:** Considera el ángulo de inclinación a la cual se instalará la luminaria.
- **Mantenimiento:** Considera el costo y que tan frecuente se debe realizar trabajos de mantenimiento de las luminarias.
- **Diseño de luminaria:** Considera el tipo de ensamblaje que va a tener la luminaria, si es resistente a golpes o apta para climas cálidos o fríos.
- **Curva fotométrica:** Considera la dirección de luz que emite la lámpara, esta puede ser a 180° hasta 360°.
- **Potencia consumida:** Valor de potencia en kW que utilizará la luminaria o grupo de luminarias.

Estos parámetros serán sometidos a una encuesta a personal con experiencia para la definición de los principales puntos que serán tomados en cuenta al momento de realizar el presente estudio para la optimización en el diseño del sistema de iluminación de una plataforma petrolera.

2.3. Métodos de optimización multicriterio

El estudio de la toma de decisiones multicriterio ha sido estudiada por varios años, teniendo así que en la década de los 70 se comienza a definir la idea decisional multicriterio, posterior se encuentra un hito en la metodología multicriterio con los estudios realizados por Charnes, Cooper y Ferguson [6] en los años 1955 y 1968 en donde se presentan manuales para la definición de modelos para la aplicación de programación lineal, si bien estos artículos estuvieron centrados en análisis financieros y en el sector industrial sirvieron como base para los estudios siguientes. Los manuales presentados por Charnes, Cooper y Ferguson fueron el inicio de la metodología multicriterio, en 1968 se presenta la definición del método ELECTRE (Elimination et Chrix Traduisant la Réalité) por parte del laboratorio Lamsade de la Universidad de París [7], y en 1972 se da la Primera conferencia mundial sobre la toma de decisiones multicriterio en la Universidad de Columbia en Carolina del Sur dando como origen las investigaciones sobre la toma de decisiones multicriterio.

Con las investigaciones y estudios realizados, Thomas Saaty [8] presenta en 1982 el Proceso Analítico Jerárquico convirtiéndose en un aporte importante para la metodología multicriterio y permitiendo que los parámetros considerados dentro de la toma de decisiones pasen de ser continuos a ser discretos, siendo importante señalar que únicamente desde 1987 hasta 1992 se han publicado 208 libros, 31 revistas, 1216 publicaciones y se dictaron 143 conferencias con relación a la toma de decisiones multicriterio, a la actualidad estos números se han disparado.

Si se observa el panorama actual día a día las personas son expuestas a la toma de decisiones, desde algo simple como elegir la vestimenta del día hasta algo complejo como la definición del proyecto más rentable para una empresa, con cada decisión se toma en cuenta los objetivos que se desean alcanzar, así como las posibles consecuencias futuras. Pero al tener varios objetivos y criterios se presentan situaciones en donde estos entran en conflicto constante entre sí, por esto se requiere de la validación multicriterio del objetivo principal por sobre el resto.

El **Paradigma Tradicional** se enfoca en los parámetros económicos ya que busca la optimización de un resultado con respecto a un solo criterio, que puede ser Maximizar el beneficio o minimizar costos, tiempos de trabajo o distancias. Su enfoque se ayuda con la definición de restricciones que limitan las soluciones posibles, y posterior, mediante métodos de optimización, se consigue definir la solución óptima de entre todas las soluciones posibles, definiendo así

a la solución óptima como la de mejor valor sobre los criterios seleccionados que satisface a las restricciones consideradas.

Por otro lado, el **Paradigma Moderno** plantea varios objetivos, que pueden ser incompatibles entre sí, dando como resultado la imposibilidad de una optimización para obtener una solución óptima total, enfocando su estudio en la satisfacción a cierto nivel de cada meta por separado, pero tomando en cuenta su interferencia con los otros objetivos.

En la actualidad la metodología de toma de decisiones multicriterio no busca satisfacer un solo objetivo en particular, trata de encontrar un equilibrio entre todos los objetivos planteados, pero también puede considerar satisfacer en lo posible a un tipo de meta que esté asociada a los objetivos.

2.3.1. Conceptos de la metodología multicriterio

Para tener un mayor entendimiento de la metodología multicriterio es necesario definir ciertos parámetros que serán usados con frecuencia en el presente estudio, en la Tabla 2.3 se encuentran detallados los principales conceptos:

Tabla 2.3: Conceptos metodología multicriterio

Concepto	Descripción
Experto / Decisor	Persona que presenta un juicio de valor que puede ser usado al momento de jerarquizar las alternativas posibles para definir la mejor opción.
Alternativas	Posibles soluciones de un problema
Atributo	Son características que logran describir a cada una de las alternativas identificadas en un problema de decisión.
Criterio	Son la dirección de optimización de los atributos, estando relacionado con la maximización o minimización de las funciones de cada atributo
Nivel de aceptación	Representan el nivel de aceptación de un atributo
Meta	Es el nivel de aceptación combinado con cada atributo

2.3.2. Clasificación de la metodología multicriterio

Como se ha detallado anteriormente, la metodología multicriterio ha sido estudiada desde hace algunos años, permitiendo que los autores e investigadores presenten varios tipos de clasificaciones, entre ellas se tiene:

- El **Análisis Multicriterio Continuo** enfrenta al decisor con un conjunto infinito de soluciones, dentro de esta clasificación se encuentra la Programación por objetivos o metas y la Programación compromiso.
- El **Análisis Multicriterio Discreto** enfrenta al decisor a un conjunto finito de soluciones, aquí se tiene métodos como las matrices de ponderación, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) o el Proceso Analítico en Redes (ANP).

Sin embargo, la Universidad de Valencia realiza una nueva clasificación basada en la valoración de variables cuantificadas, en [9] se detalla tres principales grupos:

- **Método multicriterio aplicado a la valoración a partir de información cuantificada**, o también llamado método de ponderación de valores, teniendo dentro de esta clasificación a el Método Critic, Método de la entropía y el Método de la ordenación simple.
- **Método de valoración propiamente dicha, donde se identifica el Método de la suma ponderada y la Programación por metas (GP).**
- **Método de información a partir de información no cuantificada (cualitativa)**, en este grupo se encuentra el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), Modelo MAVAM de valoración individual, Modelo MAVAM de valoración colectiva, el Proceso Analítico en Redes (ANP) y el modelo AMUVAN.

Para el presente estudio se considera comparar a los Métodos multicriterio aplicado a la valoración a partir de información cuantificada específicamente el Método Critic como ponderación de factores normalizados y al Proceso Analítico Jerárquico (AHP) del Método de información a partir de información no cuantificada.

2.3.3. Método Ponderado Normalizado (MPN)

El método ponderado normalizado analiza la toma de decisiones sobre una meta alcanzable, definiendo alternativas posibles, las cuales estarán delimitadas mediante criterios que permitirán tomar una decisión más evaluada, pero al tratarse de un modelo que considera la información cuantificada se tomarán

en cuenta los criterios que podrán ser medidos. Los criterios no necesariamente van a tener la misma importancia o peso, ya que unos pueden ser más relevantes para un grupo de expertos, pero todos van a ser tomados en cuenta al momento de querer llegar a la meta planteada.

Con este criterio para resolver el Método ponderado normalizado primero se definen los criterios relevantes o secundarios, estos criterios serán evaluados por expertos mediante una encuesta para poder ser ponderados y definir su peso. Una vez se tenga la ponderación de los criterios se trabajan considerando la ordenanza y ponderación que utiliza el método CRITIC [10].

El método CRITIC, presentado en la revista Computers Operation Reserch en 1995 y sus autores Diakoulaki, Mavrotas y Papayannakis, considera la ordenanza de los datos de acuerdo con la ponderación inicial de los criterios definidos. El peso de cada criterio está definido por la ecuación 2.1.

$$W_j = \frac{\frac{1}{r_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}} \quad (2.1)$$

Siendo:

W_j = El peso o ponderación del criterio j
 r_i = el nivel de prioridad de la opción i

Para trabajar con los datos de cada criterio se define el valor máximo, mínimo de cada uno, y se consigue el recorrido del criterio con la ecuación 2.2.

$$R_j = V_{maxj} - V_{minj} \quad (2.2)$$

Siendo:

R_j = Recorrido del criterio j
 V_{maxj} = Valor máximo del criterio j
 V_{minj} = Valor mínimo del criterio j

Una vez definida la ponderación de cada criterio se procede a dar valores a cada uno, y al tratarse de un método normalizado los valores que se asignen a cada valor podrán ser 0 o 1, siendo 0 el mejor valor y 1 el peor valor. Es importante tomar en cuenta que este método de valoración al finalizar el proceso multicriterio el menor valor será la respuesta a la meta buscada.

Con esta premisa se tienen dos consideraciones importantes al momento de definir el valor de cada criterio:

- Si se considera un criterio que deba ser maximizado, el valor del criterio se calcula con la ayuda de la ecuación 2.3.

$$X_j = \frac{V_{maxj} - V_j}{R_j} \quad (2.3)$$

Donde:

X_j = Valor normalizado del criterio.

V_j = Valor del criterio.

V_{maxj} = Valor máximo de todos los criterios.

R_j = Recorrido de los criterios.

- Si se considera un criterio que deba ser minimizado, el valor del criterio se calcula con la ayuda de la ecuación 2.4.

$$X_j = \frac{V_j - V_{minj}}{R_j} \quad (2.4)$$

Con los valores definidos para cada criterio se procede con la valoración de cada alternativa, para esto se realiza el sumatorio producto de la ponderación de cada criterio con el valor del peso total del criterio correspondiente, obtenido en la 2.1. Mediante la ecuación 2.5 se obtiene este valor.

$$P_A = \sum_{i=1}^n W_j \cdot X_{ij} \quad (2.5)$$

Siendo:

P_A = puntuación de la alternativa A.

W_j = El peso de cada criterio.

X_{ij} = El valor del criterio j para cada caso i.

La puntuación de cada alternativa permitirá definir el valor óptimo para la meta seleccionada, pero es importante tener en cuenta que al definir el valor 0 como la mejor opción para cada criterio, la puntuación de la alternativa menor será el valor buscado como respuesta al problema planteado.

2.3.4. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Método Ponderado Normalizado permite a los expertos la toma de decisiones mediante información cuantificada o medible, pero esto para problemas más complejos no puede ser utilizado, es por lo que se crearon varias opciones para realizar análisis con información cualitativa. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) nace de la propuesta del profesor Thomas L. Saaty en 1980 [8], y esta ha sido la base para varios estudios y ámbitos donde se realicen decisiones con datos complejos de analizar. La propuesta del profesor Saaty es la base de una gran cantidad de investigaciones en varios ámbitos de la vida como se pueden ver en [11], [12], [13], [14], por esto ha tenido un crecimiento importante dentro la metodología multicriterio.

En la resolución de problemas complejos se toman en cuenta criterios cuantitativos y cualitativos, esto permite tener un asertividad al momento de definir la mejor alternativa de acuerdo con un grupo de criterios. El AHP realiza un enfoque deductivo el cual considera la estructuración del problema mediante jerarquías y las hace interactuar entre sí para ver cómo se comportan. Así también, el AHP realiza un análisis sistemático con el cual hace interactuar a todos los criterios de un problema y presenta un resultado que toma en cuenta la valoración de cada criterio y su impacto a la meta total.

El AHP, al estar clasificado como método de información a partir de información no cuantificada valida los datos cualitativos para definir el problema y establecer una jerarquía, así también, se consideran los datos cualitativos que permite a los expertos dar propuestas bajo juicios y establecer preferencias. Un punto importante es que el AHP toma en cuenta la opinión de cada uno de los expertos que ayudaran a definir el problema, establecer las jerarquías de los criterios y emitir valoraciones y juicios relacionados al problema total.

La definición del problema mediante la jerarquización de sus componentes permite tener una comprensión visual del mismo, la relación entre ellos, para así poder definir valores e importancias de cada criterio y definir la mejor solución. En la Figura 2.3 se muestra una estructura simple de la jerarquización del problema.

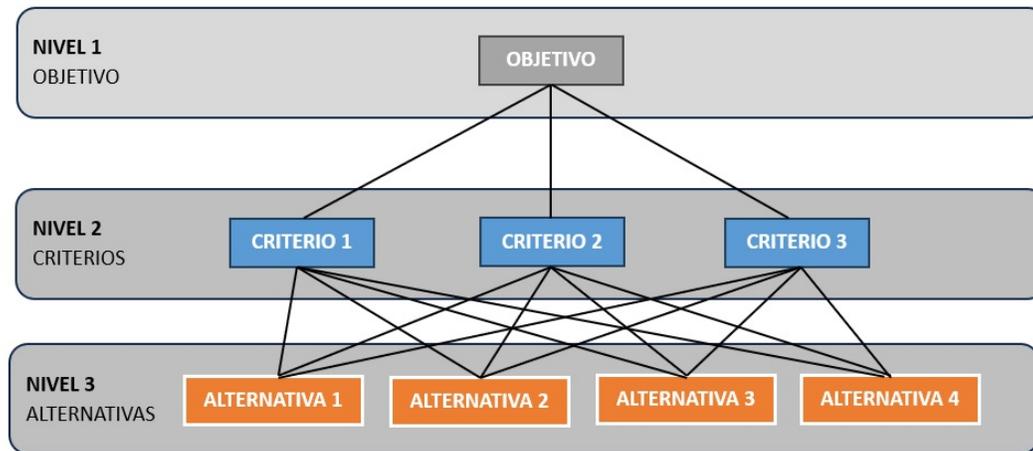


Figura 2.3: Esquema jerárquico AHP. Fuente Autor

Con estas consideraciones se puede establecer una metodología para el desarrollo del AHP:

- Se define el problema o la meta que se desea alcanzar.
- Se aplica el esquema jerárquico de acuerdo con los elementos definidos y que tienen relación con el problema, considerando que en el Nivel 2 de la Figura anterior se podría tener un nivel adicional de subcriterios, esto será definido por los expertos que estén relacionados con la delimitación del problema.
- Para definir la relevancia que tiene un elemento sobre otro se toma en cuenta los juicios emitidos por los expertos expresado en forma numérica. Esta definición estará basada en la escala fundamental de Saaty conocida como escala de importancia relativa, Tabla 2.4
- Definida la ponderación de los criterios se procede a realizar la comparación pareada entre las alternativas de acuerdo con cada criterio, esto quiere decir que se compararan cada una de las alternativas con todos los criterios definidos, es decir que si tenemos n criterios se obtendrán n matrices de las cuales se calculará el vector propio, este vector representa la ponderación de la alternativa seleccionada con respecto a cada criterio.

Tabla 2.4: Escala de importancia relativa

Valor	Escala Verbal	Comentarios
1	Igual importancia	Los dos criterios son de igual importancia
3	Importancia moderada	Criterio A moderadamente superior a criterio B
5	Importancia fuerte	Importancia fuerte del criterio A sobre el B
7	Importancia muy fuerte	Importancia demostrada del criterio A sobre B
9	Importancia extrema	Importancia indiscutible del criterio A sobre B
2, 4, 6 Y 8	Términos medios	Valores intermedios que puedes ser usados para matizar un criterio

- e) Del paso anterior se obtiene la matriz columna $n \times 1$ correspondiente al vector propio de cada criterio, y la matriz de alternativas $m \times n$ con respecto a n criterios y m alternativas. La multiplicación de estas permitirá definir la ponderación de cada alternativa en función de cada criterio, el peso y la importancia de estos, logrando determinar la mejor alternativa que podrá ser considerada como la solución al problema planteado.

Completados estos pasos se podrá armar las matrices requeridas por el desarrollo del método, la primera matriz se trata de la matriz de comparación pareada que la llamaremos "A", la cual compara a todos los criterios entre sí, de dos en dos, si n es el número de criterios la matriz tendrá un tamaño de $n \times n$. Ecuación 2.6

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{2n} \\ a_{n1} & a_{n2} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Con la determinación de la matriz A de comparaciones pareadas, no es necesario identificar todas las comparaciones entre criterios, la ecuación 2.7 define el número total de comparaciones necesarias dentro de la matriz $n \times n$

$$Ncp = \frac{n(n-1)}{2} \quad (2.7)$$

Donde:

Ncp = número de comparaciones pareadas necesarias en matriz $n \times n$.

n = Número de criterios.

El valor de N_{cp} define la cantidad de comparaciones pareadas que serán llenadas en la matriz A considerando la escala de importancia relativa, para los espacios que no sean llenados en la matriz se utilizará el criterio de reciprocidad indicado en la Ecuación 2.8 y 2.9, teniendo así:

$$N_{cp} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (2.8)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{21}} & 1 & a_{2n} \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Saaty señala que la matriz A debe cumplir con las siguientes propiedades:

- Criterio de reciprocidad que fue descrito anteriormente
- Criterio de Homogeneidad que indica que los elementos i y j son igualmente importantes, Ecuación 2.10.

$$a_{ij} = a_{ji} = 1 = a_{ii} = 1 \quad (2.10)$$

- Criterio de consistencia el cual satisface la Ecuación 2.11.

$$a_{jk} \cdot a_{kj} = a_{ii} \quad \text{para todo } 1 \leq i, j, k \leq n \quad (2.11)$$

El siguiente objetivo es realizar la suma de los valores en cada columna de la matriz A , teniendo la Ecuación 2.12:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{2n} \\ a_{n1} & a_{n2} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \sum C1 & \sum C2 & \sum C3 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Con los valores de sumatoria de cada columna se procede a determinar la matriz de comparaciones pareadas normalizadas, que se identificará como "N", Ecuación 2.13.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sum C1} & \frac{a_{12}}{\sum C2} & \frac{a_{1n}}{\sum Cn} \\ \frac{\frac{1}{a_{21}}}{\sum C1} & \frac{1}{\sum C2} & \frac{a_{2n}}{\sum Cn} \\ \frac{\frac{1}{a_{1n}}}{\sum C1} & \frac{\frac{1}{a_{2n}}}{\sum C2} & \frac{1}{\sum Cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & a_{1m} \\ n_{21} & n_{22} & a_{2m} \\ n_{n1} & n_{n2} & a_{nm} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Con la matriz N definida se procede a determinar el vector promedio, este se lo realiza con la Ecuación 2.14:

$$\begin{pmatrix} \frac{n_{11}+n_{12}+n_{1m}}{m} \\ \frac{n_{21}+n_{22}+n_{2m}}{m} \\ \frac{n_{m1}+n_{m2}+n_{mm}}{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Los valores de promedio se utilizarán al momento de concluir con el método AHP, el paso siguiente es realizar todos los pasos anteriores, pero ahora considerando la comparación pareada de los criterios y subcriterios considerando su afectación a cada una de las alternativas [15]. Al finalizar se plantea la matriz identificando cada criterio con cada alternativa y se realiza el proceso de suma producto entre los valores obtenidos en cada criterio y los valores obtenidos inicialmente en la matriz “N”.

Como punto importante se encuentra la verificación de que los datos ingresados en la matriz A sean consistentes, el método AHP mide este valor mediante el coeficiente de consistencia “CR” con ayuda de la Ecuación 2.15.

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)IR} \quad (2.15)$$

Donde:

λ_{max} = auto valor dominante.

n = dimensión de la matriz de comparación.

IR = índice aleatorio.

Para el cálculo de λ_{max} se realiza la multiplicación de la matriz de comparación pareada “A” con el vector promedio obtenido de la 2.14 y de esta multiplicación se realiza el promedio del vector columna resultante.

El Índice Aleatorio fue definido por Saaty mediante experimentos, y presento la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Valores Índice aleatorio

Tamaño de matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio (IR)	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Al sustituir valores y definido el valor de CR se validan los datos de acuerdo al ratio de consistencia definido por Saaty, en la Tabla 2.6 se muestran estos valores.

Tabla 2.6: Porcentajes máximos de CR

Tamaño de matriz (n)	Valor de CR máximo
3	5%
4	9%
5 o mayor	10%

Si la matriz A supera los valores de CR indicados en la Tabla 2.6 será necesario validar las ponderaciones pareadas y mejorarlas evitando el ingreso de datos inconsistentes.

2.3.5. 2.2.5. Encuesta a expertos para definir ponderaciones

El método [AHP](#) considera las comparaciones pareadas para formar las matrices respectivas, sin embargo, para los análisis de cada problema es recomendable que el investigador no participe en la ponderación de criterios porque indirectamente puede favorecer algún ítem. Por esto un método validado y muy utilizado [2] para la recolección de información es la aplicación de Encuestas a un grupo de expertos, los cuales tendrán amplio conocimiento en el ámbito relacionado al estudio, pero no conocerán la finalidad de la investigación. La encuesta desarrollada deberá plantearse de manera clara y concisa, para evitar que los expertos no entiendan bien lo solicitado en ella, debe estructurarse con un objetivo, justificación, metodología y desarrollo. Para la presente investigación se elaborarán dos tipos de encuestas, en la primera se solicitará a los expertos que se ordene, de acuerdo con una escala numérica, un grupo de criterios cuantitativos para la aplicación del Método Ponderado normalizado [MPN](#), Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Ejemplo de Encuesta 1

Descripción	Orden considerado	Escala
Criterio 1		1
Criterio 2		2
Criterio 3		3
Criterio 4		4
Criterio 5		5
Criterio n		n

Para el caso de la aplicación del método [AHP](#) se considera la metodología

planteada en [9] donde se aplica el proceso analítico jerárquico propio del método AHP y realiza comparaciones pareadas de una manera clara y sencilla, evitando la falta de información que pueda confundir a los expertos al momento de dar su criterio de valor. Para la aplicación de la encuesta se evitan la definición numérica al momento de definir el valor de las comparaciones, ya que puede causar confusión, por esto se utiliza una escala verbal la cual va a estar ligada a la escala de importancia relativa mostrada en la Tabla 2.4.

Un ejemplo de este tipo de encuesta se puede observar en la Tabla 2.8, donde una vez realizada la misma y obtenidos los criterios de los expertos se deberá realizar una revisión de los datos y convertirlos a la escala numérica para poder formar las matrices del método AHP.

Tabla 2.8: Encuesta aplicación método AHP

Variables	Importancia extrema	Importancia muy fuerte	Importancia fuerte	Importancia moderada	Igual Importancia	Importancia moderada	Importancia fuerte	Importancia muy fuerte	Importancia extrema	Variables
A										B
A										C
A										D
B										C
B										D
C										D

Esta encuesta será utilizada para definir las ponderaciones pareadas primero de los criterios y después de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios, en la implementación de la encuesta del estudio se explicará claramente la metodología de llenado de la encuesta para evitar las inconsistencias de los datos.

Capítulo 3

Metodología propuesta

3.1. Introducción

Como metodología para el desarrollo del presente proyecto se consideran todos los datos identificados en el marco teórico, las recomendaciones indicadas en las normativas internacionales para el diseño del sistema de iluminación exterior dentro de una plataforma petrolera, y la experiencia en la planificación de este tipo de sistemas. Se definirán los principales criterios que se tomarán en cuenta para desarrollar los métodos de optimización a ser comparados. Los criterios serán seleccionados de acuerdo con el método que se implementará, es decir todas los que sean cuantitativos serán tomados en cuenta para el desarrollo del método Ponderado Normalizado, por otro lado, para el método AHP se consideran todos los criterios definidos tanto cuantitativos como cualitativos.

Como herramienta para la ponderación de los criterios se considera elaborar una encuesta a diez expertos en el ámbito de diseño y operación de planta petroleras. Los expertos definirán los criterios que serán aplicados en el método ponderado y realizarán comparaciones pareadas para obtener la ponderación de cada criterio.

En la mayoría de los casos de estudio aplicando las metodologías de optimización recomiendan que el investigador no realice ponderaciones ya que puede favorecer inintencionalmente a algún criterio, por esto, la información de ponderación se la obtendrá utilizando la herramienta de encuestas, posteriormente se analizará la información obtenida y desarrollará los dos métodos de optimización multicriterio. Sin embargo, para la definición de las alternativas

de optimización se presentarán las principales opciones que a lo largo de los años se han venido presentando al momento de diseñar un sistema de iluminación para plantas petroleras para determinar la más óptima, de acuerdo con los criterios definidos.

Con los resultados obtenidos se presentará un caso de estudio para evaluar la eficiencia del sistema de iluminación dentro de una plataforma petrolera, se procederá a realizar simulaciones para comparar resultados y generar conclusiones del proceso de optimización. En la Figura 3.1 se presenta un resumen de la metodología del presente proyecto:

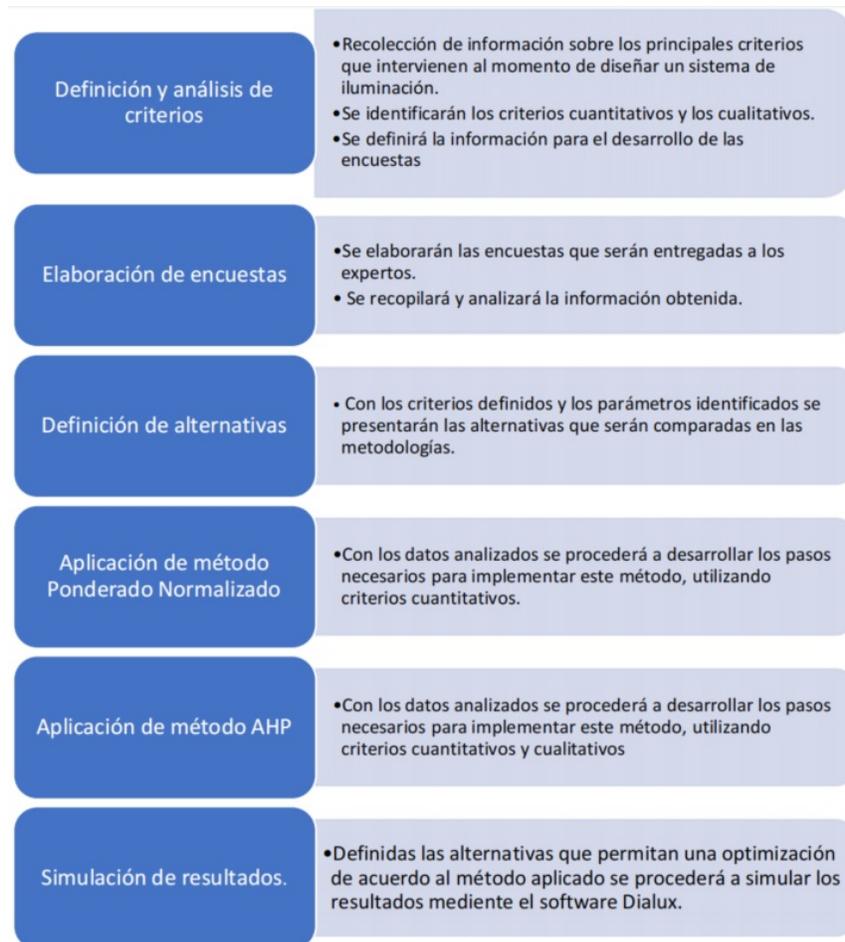


Figura 3.1: Metodología de trabajo

3.2. Definición y análisis de criterios

En el artículo [16] se definen las características de los sistemas de iluminación en plantas petrolíferas, aquí se detallan los siguientes parámetros que deberán ser tomados en cuenta al momento de implementar un sistema de iluminación en este tipo de industrias, entre los cuales podemos nombrar los siguientes:

- Material de fabricación de las luminarias.
- Temperatura de color.
- Mantenimiento reducido.
- Resistencia a la corrosión.
- Tiempo de vida útil.

Estos criterios y algunos más se pueden identificar en [5], esta información definirá los principales criterios que serán tomados en cuenta para el diseño óptimo del sistema de iluminación exterior en una planta petrolera. En la sección 2.2.4, del presente documento, se identifican los posibles parámetros que influyen al momento de diseñar un sistema de iluminación, de estos se seleccionará los más importantes y se discernirá cada uno de estos criterios de acuerdo a si son cualitativos o cuantitativos, como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Separación de criterios para elaboración de métodos

N°	Criterios	Cuantitativos	Cualitativos
1	Encendido / Apagado		X
2	Color de luz		X
3	Vida útil	X	
4	Costo	X	
5	Clasificación de luminaria		X
6	Flujo luminoso	X	
7	Mantenimiento		X
8	Distancia entre postes/luminarias	X	
9	Diseño de luminaria		X
10	Potencia consumida	X	

Para realizar las encuestas se elaborarán dos estructuras, con los criterios cuantitativos se elaborará una encuesta que permitirá a los expertos ordenarlos de acuerdo a la importancia de cada criterio en el diseño de un sistema de iluminación según su experiencia. Por otro lado, con todos los criterios se realizará la segunda estructura de encuesta, la cual buscará realizar las ponderaciones pareadas entre cada criterio, sea cualitativo o cuantitativo.

3.3. Elaboración de encuestas

Como se identificó en el artículo anterior para la aplicación del método Ponderado Normalizado se considera realizar una encuesta (Tabla 3.2) que permita al experto ordenar a los criterios, este orden se convertirá posteriormente en el peso de cada criterio al momento de desarrollar el método.

Tabla 3.2: Encuesta tipo A para orden de criterios

Ítem	Criterio	Orden
a)	Vida útil	
b)	Costo	
c)	Flujo luminoso	
d)	Distancia entre postes	
e)	Potencia consumida	

Para la segunda encuesta se consideran todos los criterios, y se utilizará el formato identificado en la Tabla 2.8, en este formato se realizarán comparaciones pareadas mediante una técnica verbal para no confundir a los expertos, los valores obtenidos se los analizará y se convertirán en datos numéricos para ser aplicados en el desarrollo del método AHP. Al tratarse de 10 criterios se realizó una encuesta que compare a todos estos entre sí.

Un punto importante es la población a la que se les realizaron las encuestas, en la Figura 3.2 y Figura 3.3 se puede observar un resumen de los expertos, los años y el área de experiencia.



Figura 3.2: Cantidad de expertos vs área de experiencia. Fuente Autor



Figura 3.3: Cantidad de expertos vs años de experiencia. Fuente Autor

De acuerdo con la variación de áreas y años de experiencia de los expertos se espera tener resultados variables, estos deberán ser manejados de manera que

se puede conseguir una ponderación para ser implementada en el desarrollo del método ponderado normalizado. En la Figura 3.4 se observa la tendencia de cada criterio con respecto a cada Experto.

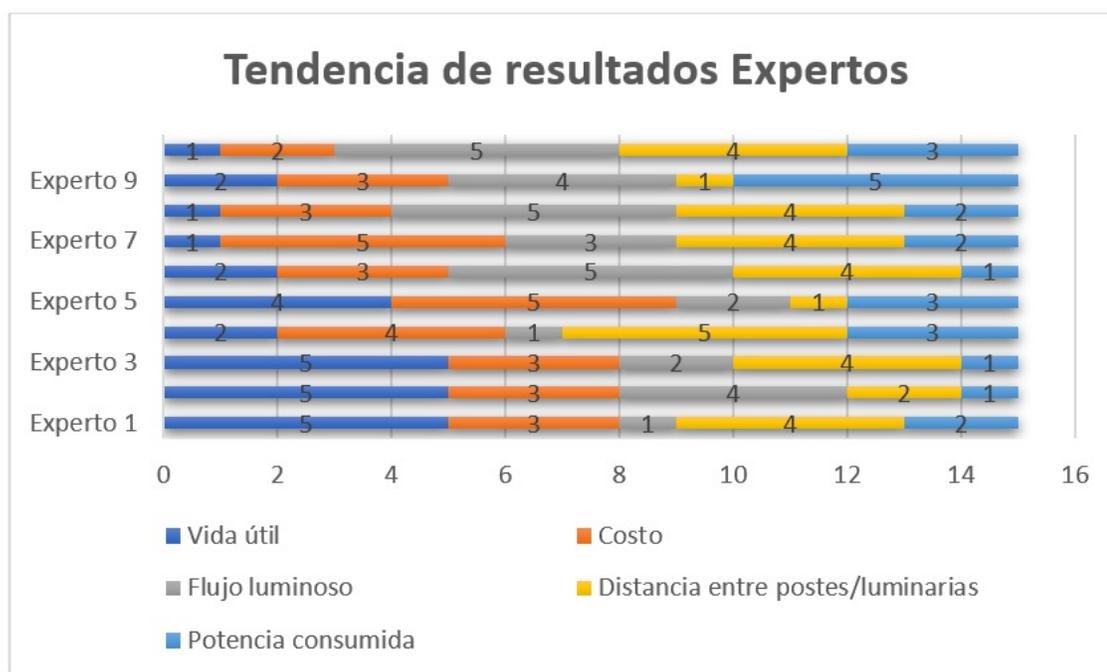


Figura 3.4: Tendencia respuestas Expertos encuesta “A”. Fuente Autor

Una vez realizadas las encuestas se procede a analizar los datos, para en el caso de la encuesta “A” definir la ponderación de cada parámetro y para la encuesta “B” definir las ponderaciones pareadas.

De acuerdo con los datos obtenidos, la ponderación de los criterios según los datos obtenidos de la aplicación de la encuesta “A” se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Análisis de datos encuesta “A”

Ítem	Criterio	Total
a)	Vida útil	28
b)	Costo	34
c)	Flujo luminoso	32
d)	Distancia entre postes/luminarias	33
e)	Potencia consumida	23

Para una mejor visualización se presenta el diagrama de Pareto, en la Figura 3.5 se ordenan los valores de mayor a menor teniendo en cuenta que como se consideró al número 0 como mejor opción en los resultados obtenidos de la encuesta el criterio que tenga menor puntuación será el que se defina como más importante dentro de la implementación del método ponderado.

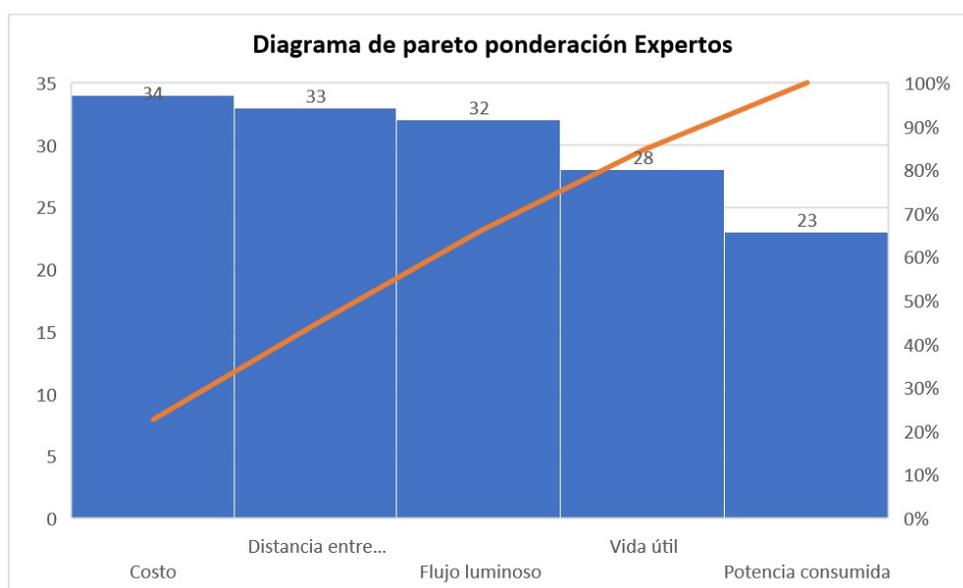


Figura 3.5: Diagrama de Pareto análisis de datos encuesta “A”. Fuente Autor

Realizada la encuesta “B” por parte de los Expertos se procede a analizar los datos, estos datos formarán parte del método [AHP](#). Estos datos deben ser analizados y comparados ya que al encuestar a Expertos de varias ramas de especialidad cada uno tiene una forma de calificar a cada criterio, por ejemplo

para los expertos que trabajan en el área de ingeniería el flujo luminoso es más importante que el costo o que la potencia consumida, en cambio para el ingeniero que trabaja en operaciones se evidencio que el costo y la clasificación de luminarias tiene mayor valor, por ultimo para los expertos que trabajan en mantenimiento la vida útil y el diseño de la luminaria tiene un valor superior en comparación a los otros criterios encuestados.

Los datos obtenidos y analizados de la encuesta “B” se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Datos obtenidos encuesta “B”

	Encendido / Apagado	Color de luz	Vida útil	Costo	Clasificación de luminaria	Flujo luminoso	Mantenimiento	Distancia entre postes	Diseño de luminaria	Potencia consumida
Encendido / Apagado	1	3	3	1/5	1/5	1	3	1/5	3	3
Color de luz	1/3	1	1	1/7	1/9	1/5	1	1/3	1	1
Vida útil	1/3	1	1	1/7	1/9	1/3	3	1	1	1
Costo	5	7	7	1	1/3	5	7	9	9	9
Clasificación de luminaria	5	9	9	3	1	3	9	5	9	9
Flujo luminoso	1	5	3	1/5	1/3	1	3	3	3	3
Mantenimiento	1/3	1	1/3	1/7	1/9	1/3	1	1	1	1
Distancia entre postes/luminarias	5	3	1	1/9	1/5	1/3	1	1	3	1
Diseño de luminaria	1/3	1	1	1/9	1/9	1/3	1	1/3	1	1
Potencia consumida	1/3	1	1	1/9	1/9	1/3	1	1	1	1

Considerando las ponderaciones de cada criterio en la Figura 3.6, así también en la aplicación del método, se validarán los datos y se definirá la congruencia de estos.

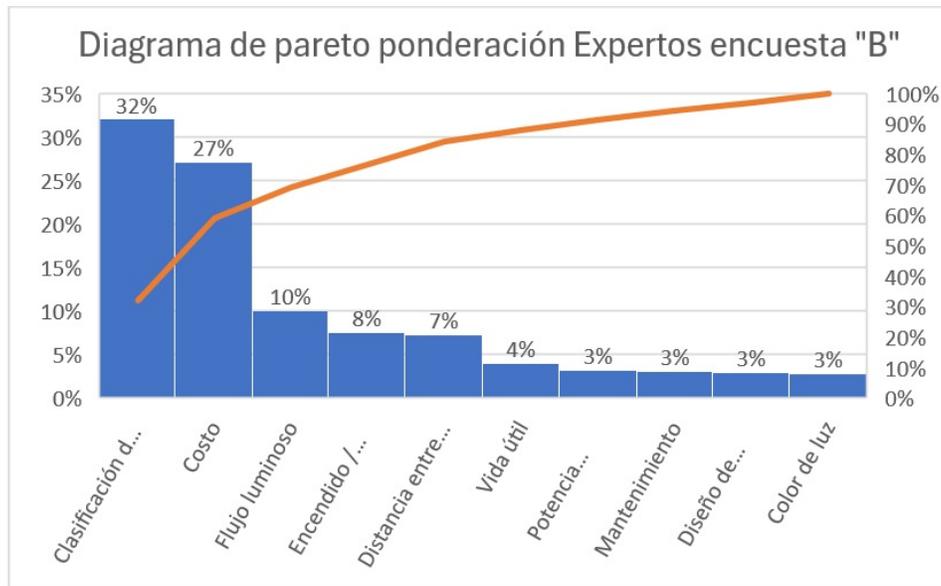


Figura 3.6: Diagrama de Pareto análisis de datos encuesta "B". Fuente Autor

3.4. Definición de alternativas

La definición de alternativas es evaluada de acuerdo a los principales criterios que afectan o son relevantes en el diseño de un sistema de iluminación exterior para plataformas petroleras, como se ha señalado, los sistemas de iluminación en plataformas existentes actualmente tienen varios tipos de luminarias, principalmente tipo **HPS** o **LED**, para mitigar este problema se ha considerado actualizar los sistemas pero por costos no realiza una sustitución total de luminarias, sin embargo, no se ha analizado si los sistemas antiguos eran más fiables u óptimos a comparación de los nuevos.

Para el modelamiento de los métodos se han determinado tres tipos de alternativas de diseño, Tabla 3.5, la primera considera luminarias tradicionales **HPS**, la segunda opción considera luminarias tipo led de una marca comercial en el país y la tercera de igual manera luminarias tipo led, pero de marcas conocidas internacionalmente. En todos los casos se consideran luminarias para área clasificadas ya que verificando las ponderaciones de los Expertos este es el

punto más importante dentro de una planta petrolera.

Tabla 3.5: Definición de alternativas

Característica	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Tipo de Luminaria	HPS	Arreglo Led tipo matriz	Arreglo Led tipo matriz
Catálogo	FMVSY400 Crouse Hinds	P23744 Sylvania	FMVA13L Crouse Hinds
Lúmenes	50000	19500	13362
Clasificación	Si	Si	Si
Vida útil [horas]	24000	70000	90000
Eficiencia [lm/W]	140	130	143
Precio	\$3,941.28	\$1,512.85	\$4,300.00
Encendido Apagado	Lento	Rápido	Rápido
Color de luz [K]	2100	5000	3000
Potencia consumida [W]	400	150	112
Mantenimiento	Alto mantenimiento	Bajo mantenimiento	Bajo mantenimiento
Distancia entre postes [m]	50	35	40
Diseño de luminaria	No es resistente a golpes, apta para climas extremos	Resistente a golpes, apta para climas extremos	Resistente a golpes, apta para climas extremos

3.5. Aplicación del método Ponderado Normalizado (MPN)

Los resultados obtenidos en la encuesta “A” permiten colocar el peso de cada criterio que se considera en el desarrollo del método Ponderado normalizado (MPN), en la Tabla 3.6 se identifica la ponderación y el peso de cada criterio considerado.

Tabla 3.6: Ponderación y pesos de criterios MPN

Criterio	Ponderación	Peso
Potencia consumida [W]	1	0.44
Vida útil [horas]	2	0.22
Flujo luminoso [Lúmenes]	3	0.15
Distancia entre postes [m]	4	0.11
Costo	5	0.09

Para el desarrollo del método se requiere la definición de la Matriz de máximos, mínimos y recorrido (Tabla 3.7), que comparará a cada valor del criterio de acuerdo con la alternativa correspondiente y definirá de entre las alternativas el valor máximo, mínimo y el recorrido al que se lo consigue substituyendo los valores de la Ecuación 2.2.

Tabla 3.7: Matriz de Máximos, Mínimos y Recorrido

	Costo	Flujo luminoso [Lúmenes]	Vida útil [horas]	Distancia entre postes [m]	Potencia consumida [W]
Alternativa 1	\$3,941.28	50000	24000	50	400
Alternativa 2	\$1,512.85	19500	70000	35	150
Alternativa 3	\$4,100.00	13362	90000	40	112
Máximo	\$4,100.00	50000	90000	50	400
Mínimo	\$1,512.85	13362	24000	35	112
Recorrido	\$2,587.15	36638	66000	15	288

Con estos datos se procede a normalizar los valores para cada criterio, considerando lo definido en la Sección 2.3.3 de este documento, para maximizar o minimizar el valor normalizado de un criterio, teniendo en cuenta que el mejor valor del criterio tendrá un valor de 0 y el peor valor 1, en la Tabla 3.8 se identifican las ecuaciones utilizadas.

Tabla 3.8: Reglas para normalizar valores de criterios

Criterio	Regla	Ecuación
Costo	Minimizar	4
Flujo luminoso [Lúmenes]	Maximizar	3
Vida útil [horas]	Maximizar	3
Distancia entre postes [m]	Maximizar	3
Potencia consumida [W]	Minimizar	4

Para la aplicación del MPN se elabora la matriz de puntuaciones (Tabla 3.9), esto permite aplicar las reglas definidas para la normalización de valores y definir la puntuación de cada alternativa de acuerdo con los pesos de cada criterio, debiendo substituir los valores obtenidos en la Ecuación 2.5.

Tabla 3.9: Desarrollo del MPN

Criterio	Peso	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Caract.	Puntuación	Caract.	Puntuación	Caract.	Puntuación
Costo	0.09	\$3,941.28	0.94	\$1,512.85	0	\$4,100.00	1
Flujo luminoso [Lúmenes]	0.15	50000	0	19500	0.83	13362	1
Vida útil [horas]	0.22	24000	1	70000	0.3	90000	0
Distancia entre postes [m]	0.11	50	0	35	1	40	0.67
Potencia consumida [W]	0.44	400	1	150	0.13	112	0
Total	1	Total	0.74	Total	0.36	Total	0.31

Como se definió desde el inicio de la aplicación del MPN la alternativa con menor valor es la mejor opción de optimización para el sistema estudiado, en la Figura 3.7 se visualiza el diagrama de Pareto aplicado a los datos obtenidos y se define que la mejor opción es la alternativa 3 a pesar de tener un costo por luminaria superior a las otras dos alternativas.

3.6. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)45

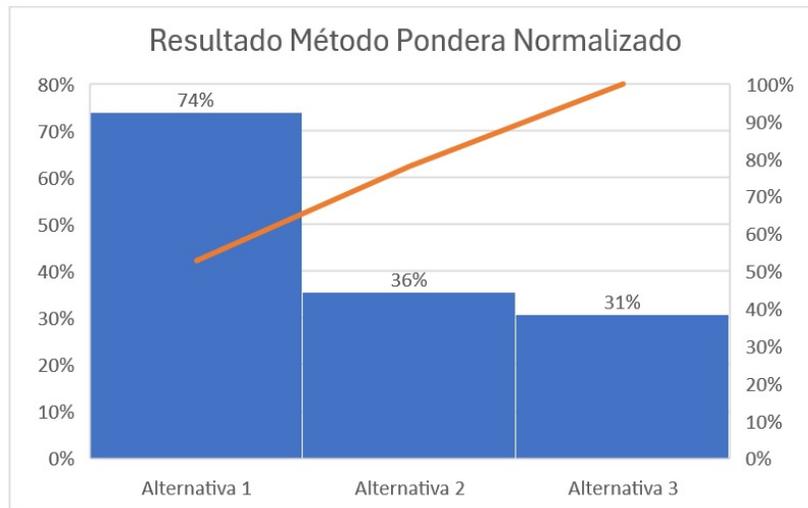


Figura 3.7: Resultados MPN. Fuente Autor

3.6. Aplicación del método Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Como se detalla en la Sección 2.3.4, del presente documento, para implementar el AHP es necesario definir las jerarquías, objetivo, criterios y alternativas del caso estudio, en la Figura 3.8 se puede observar el esquema jerárquico aplicado al presente caso de estudio.

Los datos obtenidos de la encuesta “B” deben ser congruentes, por lo que es necesario calcular el coeficiente de congruencia substituyendo valores en la Ecuación 2.15, para esto se seguirán los siguientes pasos:

- Normalizar la matriz de los datos de la encuesta “B” para definir el vector ponderación.
- Multiplicar la matriz original “B” por el vector ponderación, la suma de este vector corresponde a λ_{max} .
- El valor de IR se lo puede definir de acuerdo con el valor recomendado en la Tabla 2.5 o mediante la Ecuación 3.1.

$$IR = \frac{1,98(n - 2)}{n} \quad (3.1)$$

3.6. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)46

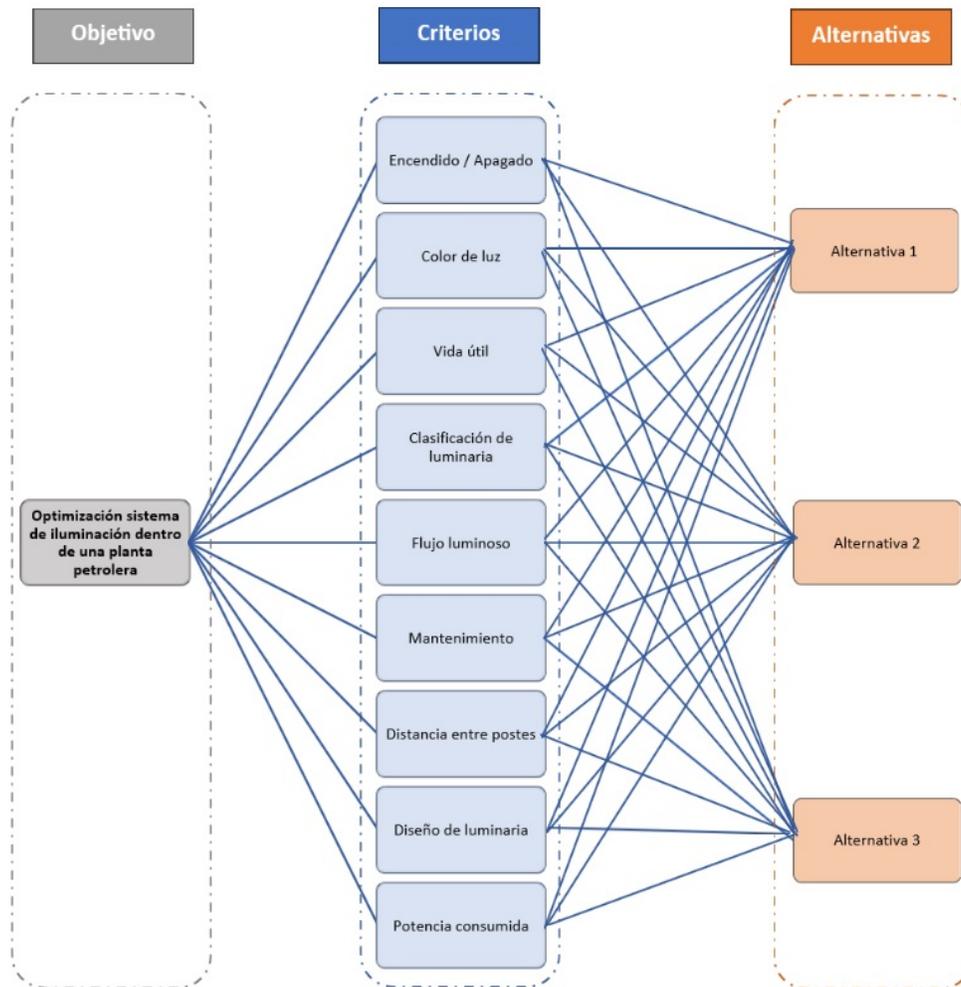


Figura 3.8: Esquema jerárquico caso de estudio. Fuente Autor

- Por último, se calcula el valor de CR sustituyendo valores de la Ecuación 2.5. En la Tabla 3.10 se observa los valores obtenidos para la Matriz Normalizada.

Analizando los datos de la matriz normalizada se puede definir cuáles son los criterios que tiene mayor peso de acuerdo con los datos obtenidos de la Tabla 3.10, aquí se observa que el porcentaje mayor corresponde a la clasificación de la luminaria, seguido del costo y del flujo luminoso.

3.6. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)47

Tabla 3.10: Matriz normalizada

	MATRIZ NORMALIZADA										PROMEDIO
Encendido / Apagado	0.05	0.09	0.11	0.04	0.08	0.08	0.1	0.01	0.09	0.1	8%
Color de luz	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	3%
Vida útil	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.1	0.05	0.03	0.03	4%
Costo	0.27	0.22	0.26	0.19	0.13	0.42	0.23	0.41	0.28	0.3	27%
Clasificación de luminaria	0.27	0.28	0.33	0.58	0.38	0.25	0.3	0.23	0.28	0.3	32%
Flujo luminoso	0.05	0.16	0.11	0.04	0.13	0.08	0.1	0.14	0.09	0.1	10%
Mantenimiento	0.02	0.03	0.01	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	3%
Distancia entre postes/luminarias	0.27	0.09	0.04	0.02	0.08	0.03	0.03	0.05	0.09	0.03	7%
Diseño de luminaria	0.02	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	3%
Potencia consumida	0.02	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	3%
SUMA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100%

El vector promedio se lo multiplica por la matriz original mostrada en la Tabla 3.4 y se obtiene la prioridad de cada criterio, la suma permite definir el valor de λ_{max} . Definidos estos valores se consigue el Coeficiente de Congruencia (Tabla 3.11).

Tabla 3.11: Vector prioridad y Coeficiente de Congruencia

	PRIORIDAD
Encendido / Apagado	0.79
Color de luz	0.3
Vida útil	0.43
Costo	3.15
Clasificación de luminaria	3.61
Flujo luminoso	1.09
Mantenimiento	0.34
Distancia entre postes	0.86
Diseño de luminaria	0.31
Potencia consumida	0.36
Total (λ_{max})	11.24
n	10
IR	1.584
CR	8.70%

De acuerdo con los valores recomendados de la Tabla 2.6 el valor de CR debe

3.6. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)48

ser menor al 10%, como podemos observar en los resultados de CR del presente caso de estudio los datos de la encuesta “B” cumplen con este criterio y se define que los datos son congruentes.

Con las comparaciones pareadas de cada criterio el paso siguiente es dar un peso a las alternativas, para esto se realiza comparaciones pareadas de cada alternativa, pero con respecto a cada criterio, no se consideró solicitar estas ponderaciones a los expertos ya que estos datos serán comparados de acuerdo con los valores reales cada alternativa. El resultado final es obtener el vector promedio, al cual se lo identifica como el peso de cada alternativa.

Desde la Tabla 3.12 hasta la Tabla 3.21 se identifican las comparaciones pareadas de las alternativas de acuerdo con los criterios.

Tabla 3.12: Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Encendido / Apagado

Criterio de Encendido / Apagado							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Vector promedio
Alternativa 1	1	1/7	1/7	0.07	0.07	0.07	0.07
Alternativa 2	7	1	1	0.47	0.47	0.47	0.47
Alternativa 3	7	1	1	0.47	0.47	0.47	0.47
TOTAL	15	2.14	2.14				

3.6. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)49

Tabla 3.13: Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Color de luz

Criterio de Color de luz							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Vector promedio
Alternativa 1	1	1/9	1/7	0.06	0.08	0.03	0.06
Alternativa 2	9	1	3	0.53	0.69	0.72	0.65
Alternativa 3	7	1/3	1	0.41	0.23	0.24	0.29
TOTAL	17	1.44	4.14				

Tabla 3.14: Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Vida útil

Criterio de Vida útil							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Vector promedio
Alternativa 1	1	1/7	1/9	0.06	0.03	0.08	0.06
Alternativa 2	7	1	1/3	0.41	0.24	0.23	0.29
Alternativa 3	9	3	1	0.53	0.72	0.69	0.65
TOTAL	17	4.14	1.44				

3.6. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)50

Tabla 3.15: Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Costo

Criterio de Costo							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Vector promedio
Alternativa 1	1	1/9	1	0.09	0.08	0.14	0.11
Alternativa 2	9	1	5	0.82	0.76	0.71	0.77
Alternativa 3	1	1/5	1	0.09	0.15	0.14	0.13
TOTAL	11	1.31	7				

Tabla 3.16: Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Clasificación de luminaria

Criterio de Clasificación de luminaria							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Vector promedio
Alternativa 1	1	3	1/3	0.23	0.43	0.2	0.29
Alternativa 2	1/3	1	1/3	0.08	0.14	0.2	0.14
Alternativa 3	3	3	1	0.69	0.43	0.6	0.57
TOTAL	4.33	7	1.67				

3.6. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)51

Tabla 3.17: Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Flujo luminoso

Criterio de Flujo luminoso							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Vector promedio
Alternativa 1	1	5	7	0.74	0.79	0.64	0.72
Alternativa 2	1/5	1	3	0.15	0.16	0.27	0.19
Alternativa 3	1/7	1/3	1	0.11	0.05	0.09	0.08
TOTAL	1.34	6.33	11				

Tabla 3.18: Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Mantenimiento

Criterio de Mantenimiento							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Vector promedio
Alternativa 1	1	1/9	1/9	0.05	0.08	0.03	0.05
Alternativa 2	9	1	3	0.47	0.69	0.73	0.63
Alternativa 3	9	1/3	1	0.47	0.23	0.24	0.32
TOTAL	19	1.44	4.11				

3.6. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)52

Tabla 3.19: Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Distancia entre postes

Criterio de Distancia entre postes							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Vector promedio
Alternativa 1	1	1	3	0.43	0.2	0.69	0.44
Alternativa 2	1	1	1/3	0.43	0.2	0.08	0.24
Alternativa 3	1/3	3	1	0.14	0.6	0.23	0.32
TOTAL	2.33	5	4.33				

Tabla 3.20: Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Diseño de luminaria

Criterio de Diseño de luminaria							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Vector promedio
Alternativa 1	1	1/9	1/9	0.05	0.03	0.08	0.05
Alternativa 2	9	1	1/3	0.47	0.24	0.23	0.32
Alternativa 3	9	3	1	0.47	0.73	0.69	0.63
TOTAL	19	4.11	1.44				

3.6. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP) 53

Tabla 3.21: Comparaciones pareadas de alternativas con respecto al criterio de Potencia consumida

Criterio de Potencia consumida							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz Normalizada			Vector promedio
Alternativa 1	1	1/7	1/9	0.06	0.02	0.09	0.05
Alternativa 2	7	1	1/7	0.41	0.12	0.11	0.22
Alternativa 3	9	7	1	0.53	0.86	0.8	0.73
TOTAL	17	8.14	1.25				

Para determinar la priorización de cada una de las alternativas con respecto a todos los criterios es necesario realizar la operación suma producto entre el vector promedio obtenido de las comparaciones pareadas y el peso total de cada criterio obtenido de la matriz normalizada, en la Tabla 3.22 se identifica el vector promedio obtenido de las tablas anteriores para cada alternativa, la ponderación obtenida de la matriz normalizada y el resultado de la operación suma producto entre estos valores con respecto a cada alternativa, este resultado es la respuesta a la aplicación del AHP en el caso de estudio.

Tabla 3.22: Desarrollo del AHP

Criterio / Alternativa	Encendido / Apagado	Color de luz	Vida útil	Costo	Clasificación de luminaria	Flujo luminoso	Mantenimiento	Distancia entre postes	Diseño de luminaria	Potencia consumida	Priorización
Alternativa 1	0.07	0.06	0.06	0.11	0.29	0.72	0.44	0.44	0.05	0.05	0.25
Alternativa 2	0.47	0.65	0.29	0.77	0.14	0.19	0.24	0.24	0.32	0.22	0.38
Alternativa 3	0.47	0.29	0.65	0.13	0.57	0.08	0.32	0.32	0.63	0.73	0.37
Ponderaciones	0.08	0.03	0.04	0.27	0.32	0.1	0.03	0.07	0.03	0.03	

Con estos valores en la Figura 3.9 se define la alternativa adecuada de acuerdo con el peso de los criterios obtenidos en las encuestas realizada a los expertos, teniendo que la alternativa que más se acomoda a las necesidades de diseño es la opción 2.

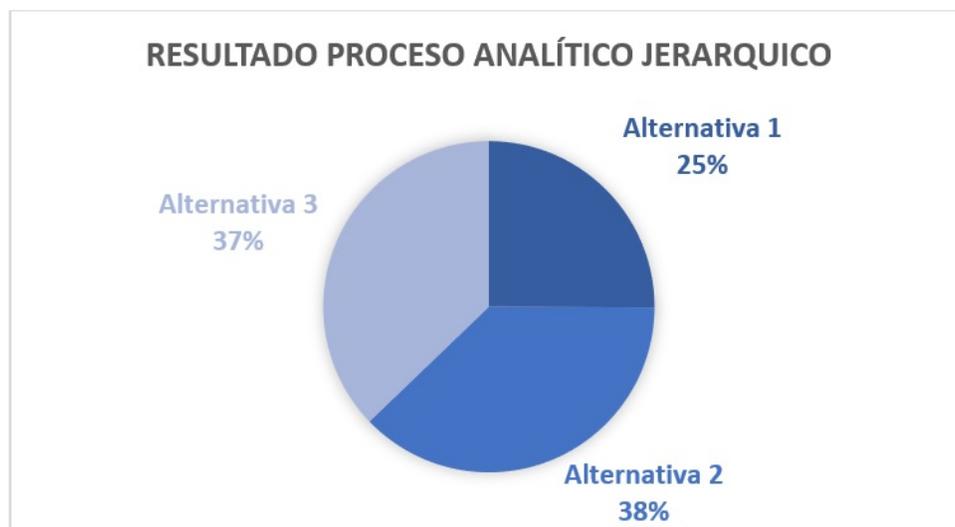


Figura 3.9: Resultado Proceso Analítico Jerárquico [AHP](#). Fuente Autor

3.7. Simulación de resultados

Para la simulación de resultados se utilizará el software Dialux EVO 12.1, en este software se modelará una plataforma petrolera referencial a la cual se incorporarán los nuevos postes con las luminarias señaladas en cada alternativa.

Para el método ponderado normalizado la alternativa optimizada, de acuerdo con los criterios y pesos considerados, es la alternativa 3, en la Figura 3.10 y Figura 3.11 se visualiza la simulación en Dialux de esta alternativa.

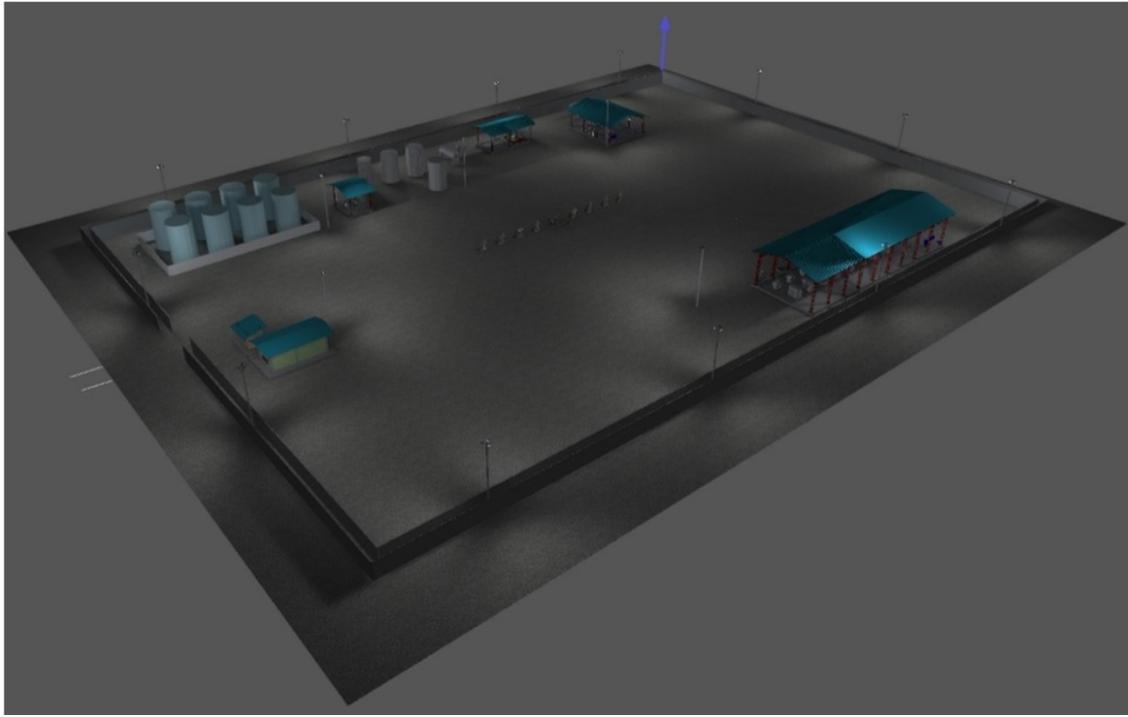


Figura 3.10: Simulación alternativa 3 Método Ponderado Normalizado. Fuente Autor

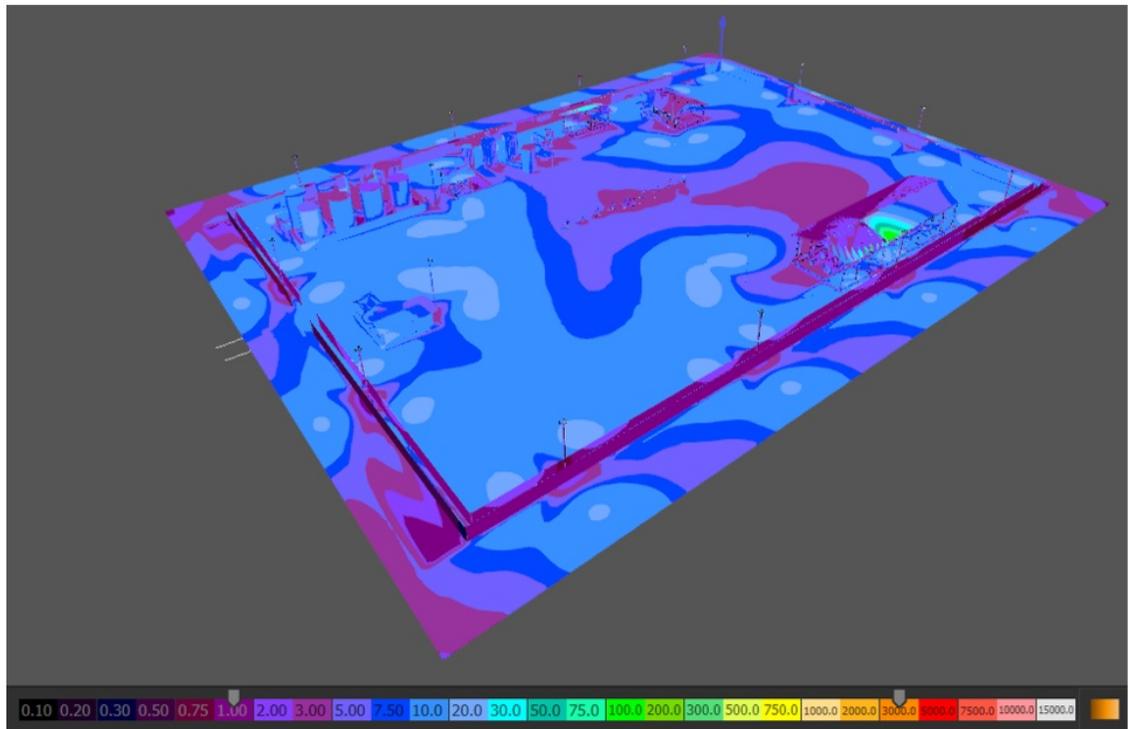


Figura 3.11: Simulación alternativa 3 Método Ponderado Normalizado – Colores Falsos. Fuente Autor

En la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico la opción que se definió como óptima es la opción 2. En la Figura 3.12 y 3.13 se puede observar la simulación de esta opción.

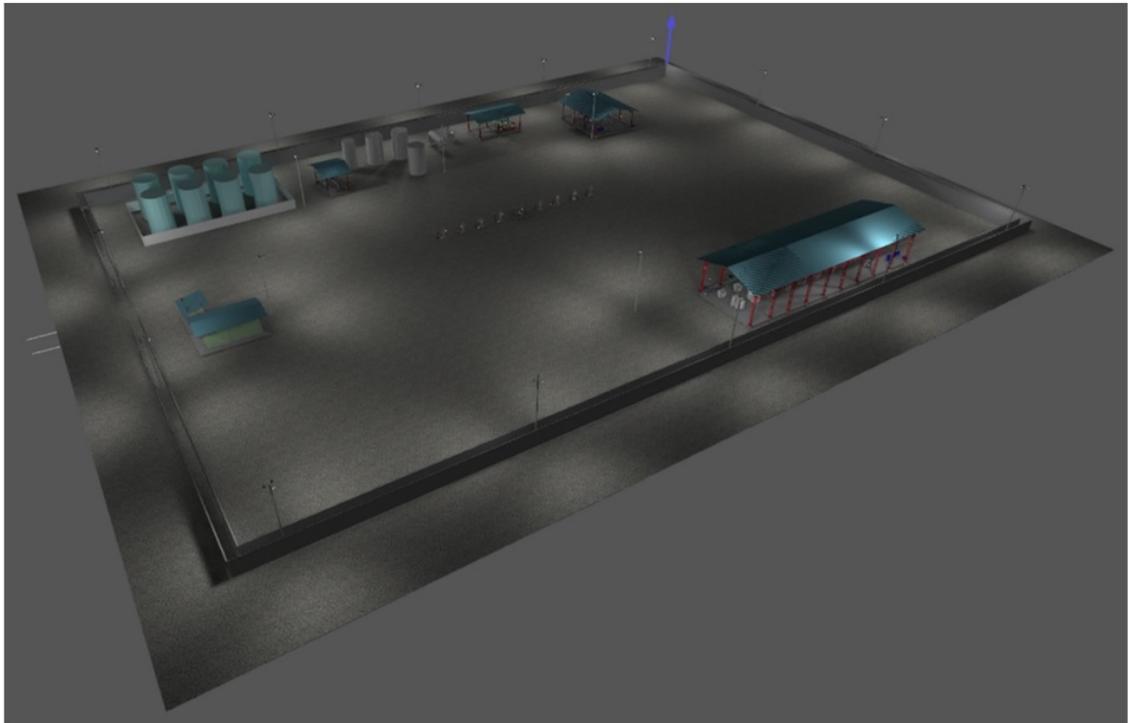


Figura 3.12: Simulación alternativa 2 Proceso Analítico Jerárquico. Fuente Autor

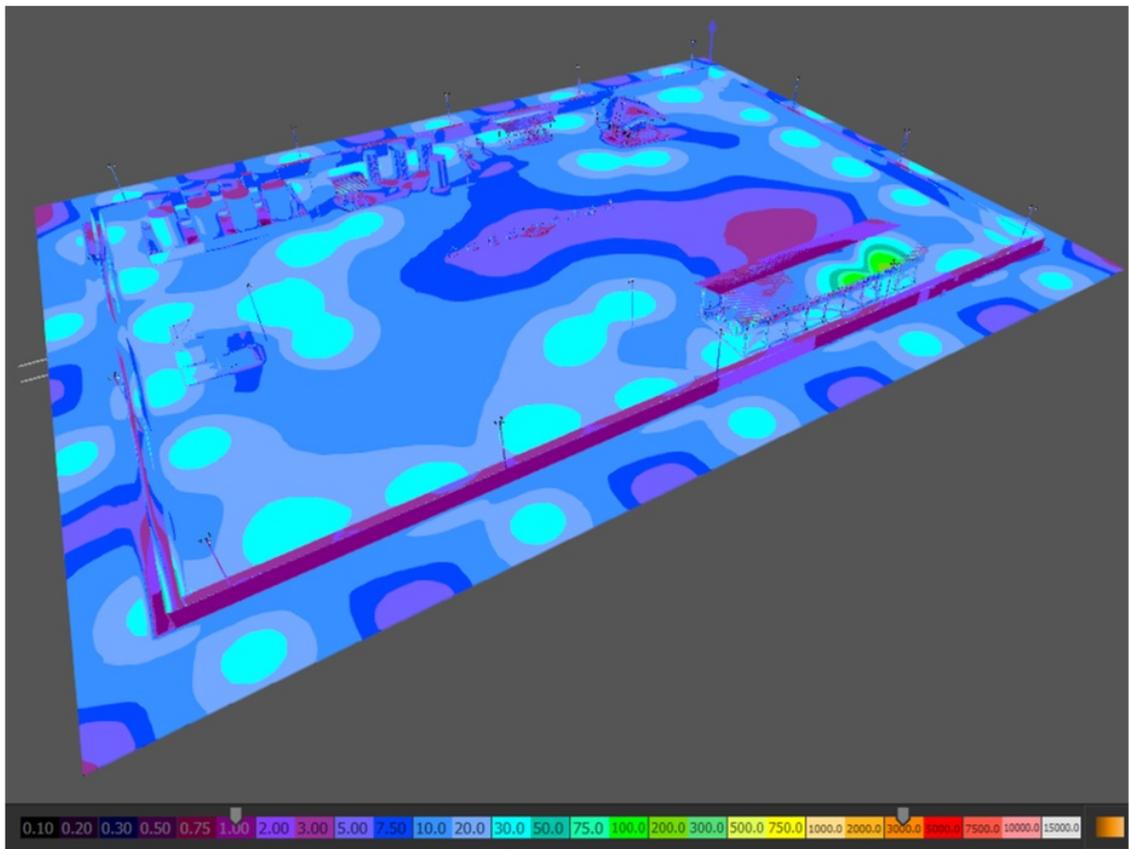


Figura 3.13: Simulación alternativa 2 Proceso Analítico Jerárquico – Colores Falsos. Fuente Autor

Capítulo 4

Análisis de resultados

Con la implementación de los dos métodos de optimización multicriterio al presente caso de estudio se identificó que de acuerdo a los criterios considerados la solución puede variar, para el método ponderado normalizado se consideraron 5 criterios cuantitativos, se ponderó los criterios con los datos obtenidos de la encuesta “A”, y se implementó este método.

Por otro lado, para el proceso analítico jerárquico se consideraron criterios tanto cualitativos como cuantitativos, esto permitió tener un rango mayor al momento de tener una solución optimizada, sin embargo, la aplicación de este método tiene ciertos parámetros importantes para que la solución sea correcta y congruente. Primero para que los datos sean correctos fue necesario validar los valores obtenidos de la encuesta “B” teniendo en mente la congruencia, es decir si el criterio A se lo considera mejor que el criterio B y el criterio B es mejor que el criterio C no se podrá decir que el criterio C es mejor que el criterio A. Esto requirió un análisis más detallado al momento de validar los datos ya que los expertos encuestados eran de diferentes áreas de experiencia y tenían diferentes ponderaciones para los criterios.

Si se compara el peso considerado para cada criterio de acuerdo con el método de optimización se puede definir que para el MPN el criterio con mayor importancia para los expertos es la potencia consumida, pero si se observa la ponderación de los criterios del AHP tenemos que este criterio ocupa el puesto 7 en el rango de importancia ya que existen criterios afectan de mayor manera al momento de diseñar un sistema de iluminación exterior. Esta comparativa se la puede realizar con los 5 criterios que fueron tomados en cuenta para la ampliación del MPD y que los comparte con el método AHP (Figura 4.1).

Si bien los Expertos fueron los mismos encuestados tanto para la encuesta

“A” como la encuesta “B”, se puede observar que al tener mayor rango de decisión con el aumento de criterios los valores de ponderación varían ya que en el método AHP se presentan criterios que sin ser cuantitativos tiene mayor importancia al momento de realizar un diseño del sistema de iluminación.

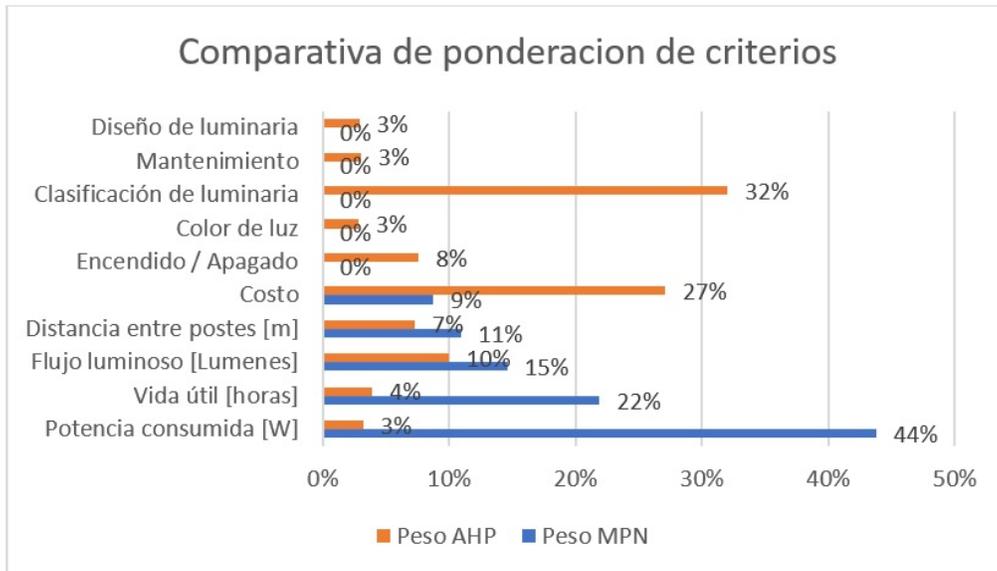


Figura 4.1: Comparación de ponderaciones de criterios entre métodos de optimización. Fuente Autor

De igual manera, una vez aplicado cada método de optimización multicriterio se observa en la Figura 4.2 la ponderación que se consiguió para cada alternativa, denotando que si no se consideran los criterios cualitativos la mejor opción para la optimizar un sistema de iluminación exterior dentro de plataformas petroleras es el tres (3) como se puede ver en la sección 3.5 del presente estudio, pero si se toma en cuenta este criterio de acuerdo a la sección 3.6 la mejor opción es la dos (2).

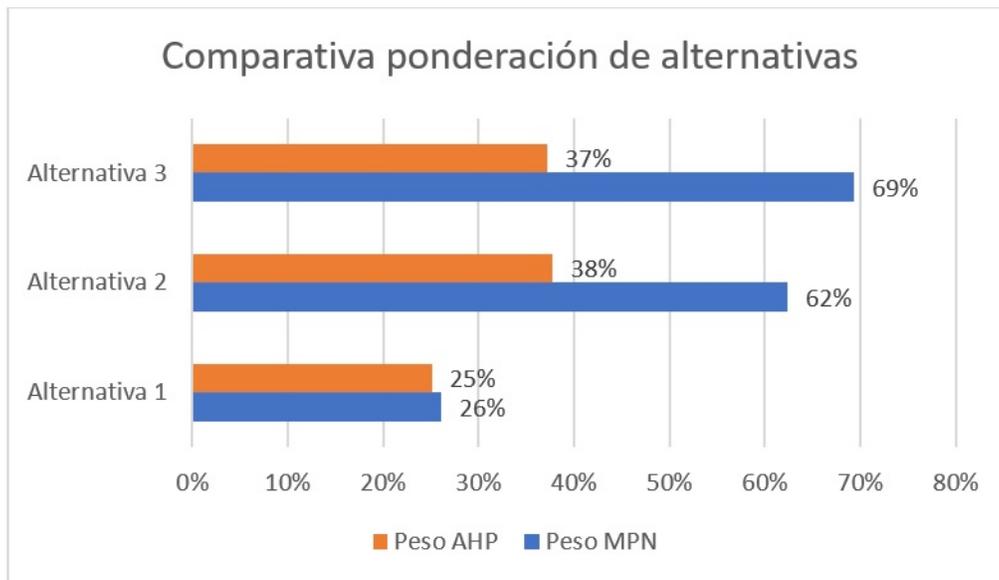


Figura 4.2: Comparación de ponderaciones de alternativas entre métodos de optimización. Fuente Autor

Con la simulación realizada en Dialux se identificó de mejor manera los criterios que fueron optimizados, como se menciona antes la alternativa tres (3) es la opción adecuada al momento de implementar el MPN, sin embargo, si se revisa la Sección 3.7 de este estudio, ésta no necesariamente es la mejor opción para el diseño de sistemas de iluminación en plataforma petroleras ya que se tiene un menor nivel de iluminación por un mayor costo. Por otro lado, en el método AHP la opción más adecuada para la optimización del sistema de iluminación es la alternativa dos (2) teniendo un mejor rendimiento en algunos criterios importantes como el costo y niveles de iluminación.

Si bien la aplicación de MPN basa sus ponderaciones de acuerdo con los valores reales de cada criterio, esto no necesariamente es el camino correcto para considerar una decisión optimizada ya que no considera más opciones que pueden ser importantes para el diseñador. El método AHP considera todos los criterios importantes que intervienen en el diseño de un sistema de iluminación, pero a estos se los analizarán desde el punto de vista de ponderación pareada, quiere decir que, si bien algunos criterios pueden ser medidos y otros no, a todos se los comparará para poder establecer el peso del criterio de acuer-

do con la valoración de un experto que se encargará de realizar la ponderación pareada de cada uno.

Al observar los resultados realizados en las simulaciones de la alternativa 2 y la alternativa 3 se puede definir con mayor claridad en que aspectos cada una es más fuerte y que criterios han sido optimizados.

En la Figura 4.3 hasta la Figura 4.7 se podrá identificar, de mejor manera, algunos resultados obtenidos en las simulaciones realizadas y la comparativa entre las dos alternativas que fueron definidas como opciones de optimización, de acuerdo con cada método implementado.

En la Figura 4.3 se puede observar el nivel de iluminación promedio medida a piso, en luxes, para cada alternativa simulada, si bien las dos alternativas cumplen con lo recomendado por la norma API RP 540, que son 10 luxes medidos a piso, se observa que la alternativa 3 tiene el resultado cercano al valor recomendado y la sensación lumínica es deficiente (ver Figura 3.10), por esto la alternativa 2 al tener un valor un poco superior a lo recomendado presenta una mejor sensación lumínica para realizar los trabajos dentro de plataformas petroleras.

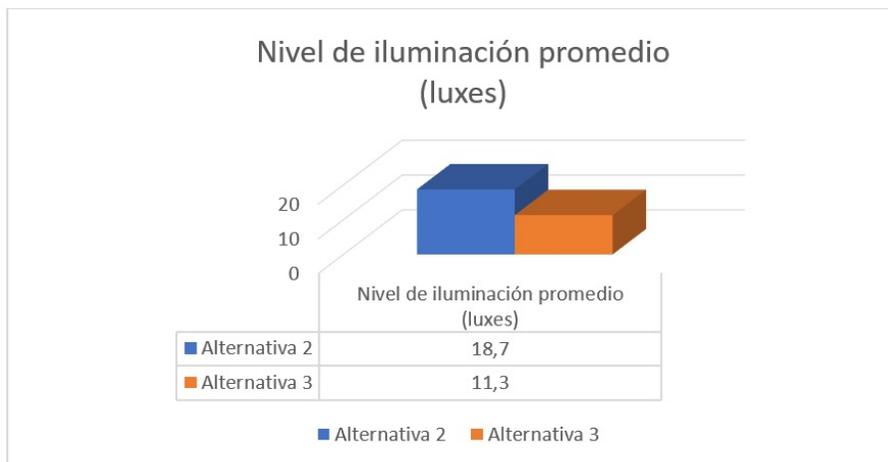


Figura 4.3: Nivel de iluminación promedio resultados obtenidos. Fuente Autor

Para la cantidad de luminarias instaladas se consideró el criterio de distancia entre postes definida en cada alternativa, con esto se pueden determinar el número de luminarias y postes instalados, para que los sistemas de iluminación

tengan los parámetros necesarios para que el sistema de iluminación funcione de forma óptima, en la Figura 4.4 se observa la comparativa para postes instalados y en la Figura 4.5 la comparativa de luminarias utilizadas.

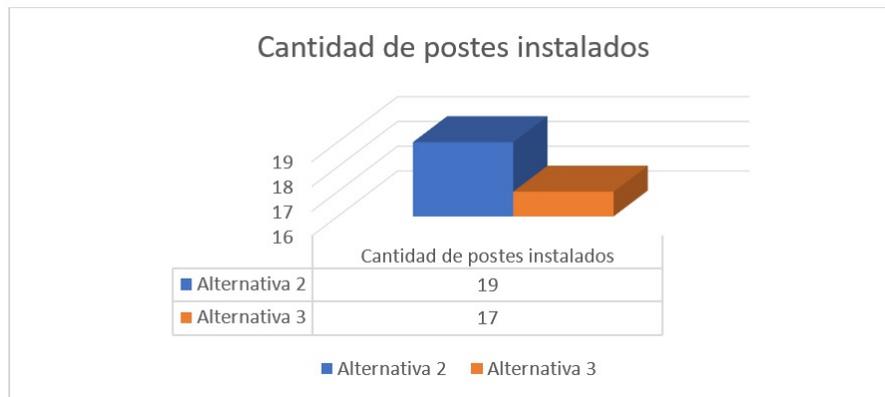


Figura 4.4: Cantidad de postes instalados, de acuerdo con la simulación. Fuente Autor

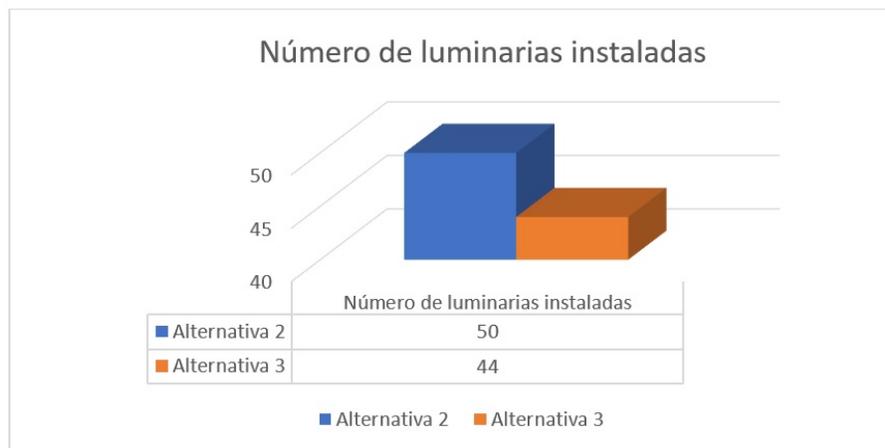


Figura 4.5: Número de luminarias instaladas en simulaciones. Fuente Autor

Con estos valores definidos se puede tener un valor global del costo instala-

ción de postes con la compra de cada luminaria, en la Figura 4.6 se identifica cual sería el valor económico para la implementación de cada alternativa.

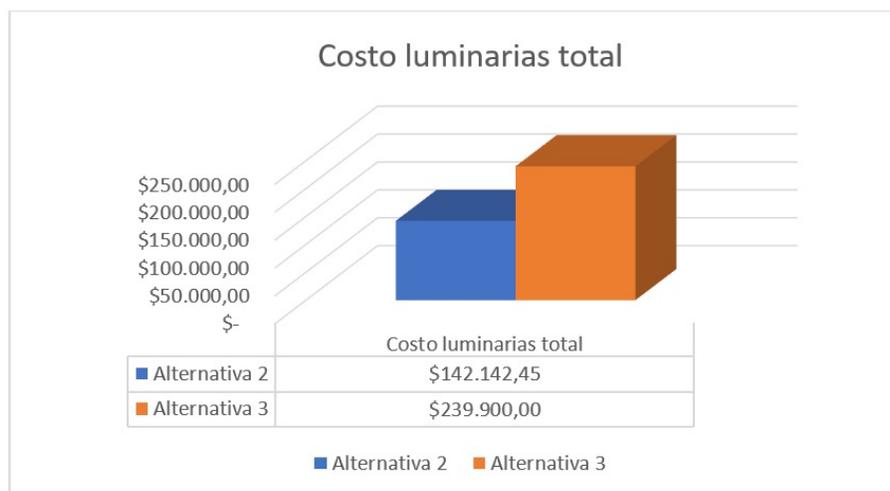


Figura 4.6: Costo global de instalación para cada alternativa. Fuente Autor

Si bien la alternativa 2 tiene mayor cantidad de luminarias y postes, en la Figura 4.6 se puede observar que esta opción representa un menor costo de instalación, representando una optimización en este criterio.

Para el criterio de Potencia total consumida en la Figura 4.7 se visualiza que este criterio tiene una mayor importancia cuando el número de criterios es disminuido, como es el caso del MPN, en cambio cuando existen un mayor número de criterio a comparar este criterio disminuye su importancia.

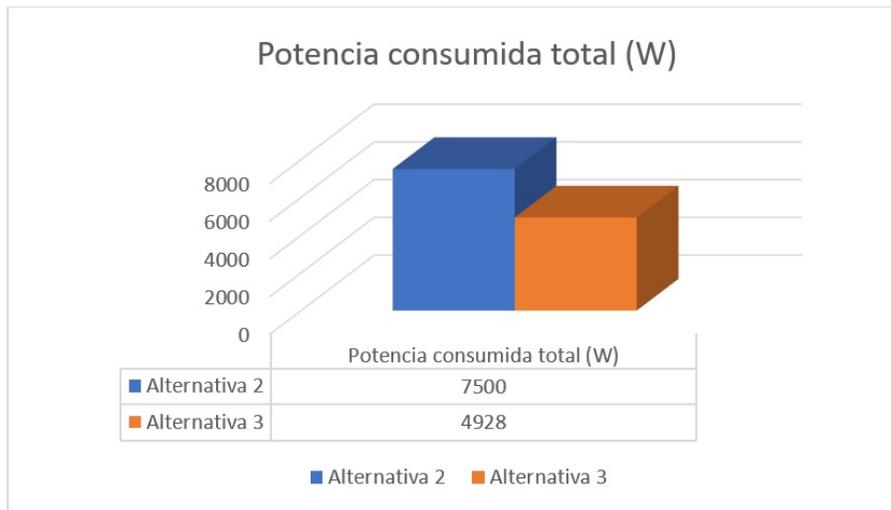


Figura 4.7: Potencia total consumida. Fuente Autor

Si bien en proyectos eléctricos industriales el criterio presentado en la Figura 4.7 puede tener una mayor relevancia, dentro de una plataforma petrolera existen cargas más altas que afectan al sistema eléctrico con mayor impacto por esto el criterio de potencia consumida del sistema de iluminación pierde importancia.

Capítulo 5

Conclusiones

- El implementar metodologías multicriterio para la toma de decisiones permite encontrar alternativas de optimización para sistemas eléctricos o procesos, en el desarrollo del presente trabajo de investigación se logra comparar dos metodologías multicriterio, el Método Ponderado Normalizado y el Proceso Analítico Jerárquico, se analizó el estado del arte para definir el proceso correcto de aplicación de estos métodos, se definieron los datos necesario y se lograron tener resultados congruentes para optimizar el diseño de sistemas de iluminación en plataformas petroleras.
- La definición de los criterios y su ponderación es la base en los métodos considerados en el presente trabajo de investigación, dicha ponderación se la realizó a través de encuestas a Expertos en el área de ingeniería, mantenimiento y operaciones de plantas petroleras. Si bien se podrá tener la experiencia para definir un peso a cada criterio es recomendable que terceras personas que no tengan acceso a la investigación realicen esta ponderación, con esto se logra tener un espectro de decisión más amplio y se evita, inconscientemente, que se pueda favorecer a un criterio. Pero se debe definir con cuidado la muestra para elaborar las encuestas, ya que si se toma en cuenta a Expertos relacionados a una sola área de experiencia sus ponderaciones se direccionarán a ciertos criterios que no necesariamente son los más importantes para expertos en otras áreas, si bien esto representa un mayor análisis de la información obtenida en las encuestas, los resultados tratarán de satisfacer los requerimientos de todos los Expertos.
- El Método Ponderado Normalizado basa sus ponderaciones de acuerdo

con los valores reales de cada criterio, esto no necesariamente es el camino correcto para considerar una decisión optimizada ya que no considera más opciones que pueden ser importantes para el diseñador. El Proceso Analítico Jerárquico considera criterios cualitativos y cuantitativos que son importantes en el diseño de un sistema de iluminación, si bien algunos criterios pueden ser medidos y otros no, a todos se los compara para poder establecer el peso del criterio de acuerdo con la valoración de un experto que se encargará de realizar la ponderación pareada de cada uno.

- Como complemento se realizó la simulación de las alternativas consideradas en el presente trabajo de investigación, para poder verificar de mejor manera que criterios se logró optimizar dentro del diseño del sistema de iluminación exterior en plataformas petroleras, si bien la alternativa 3 es la definida como optimizada en el MPN, esta opción no considera criterios cualitativos que tuvieron mayor peso en la implementación de AHP, donde la alternativa 2 fue la de mayor ponderación. Estos resultados fueron apreciados de mejor manera gracias a las simulaciones realizadas.
- Para proyectos futuros se recomienda la utilización del método AHP ya que éste no basa su método de ponderación en valores reales de los criterios, sino que considera la experiencia de una o varias personas para definir estos valores y tener un resultado que satisfaga a las necesidades reales del sistema investigado.

Capítulo 6

Glosario

AHP Término relacionado metodología de optimización multicriterio Proceso Analítico Jerárquico.

ANP Término relacionado metodología de optimización multicriterio Proceso Analítico en Redes.

GP Término relacionado metodología de optimización multicriterio Programación por metas Goal programming.

HPS Término relacionado a la tecnología de luminarias, Alta presión de sodio.

LED Término relacionado a la tecnología de luminarias, Light-Emitting Diode.

MPN Término relacionado metodología de optimización multicriterio Método Ponderado Normalizado.

Bibliografía

- [1] A. P. Institute, “Electrical installations in petroleum processing plants,” pp. 1–91, 1999.
- [2] R. M. Morillas, N. Dirigida, J. Ramón, and A. Díaz, “Identificación de indicadores para la evaluación de instalaciones de alumbrado público tesis doctoral,” 2020.
- [3] Westinghouse, *Manual del alumbrado*, 4th ed. Editorial Dossat, 1973.
- [4] L. V. Cardona, “Selección de iluminación sostenible mediante análisis multicriterio,” 2013.
- [5] Sylvania, “Guía técnica de iluminación,” 2021.
- [6] A. Charnes, W. W. Cooper, and R. O. Ferguson, “Optimal estimation of executive compensation by linear programming,” *Management Science*, vol. 1, pp. 138–151, 1 1955.
- [7] B. Uzun, R. A. Bwiza, and D. U. Ozsahin, *ELimination Et Choix Traduisant La REalité (ELECTRE)*, 2021.
- [8] L. Vargas and C. St, “The analytic hierarchy process,” 2022. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/6161>
- [9] A. Jerónimo, A. Bellver, and F. G. Martínez, “Nuevos métodos de valoración modelos multicriterio 2ª edición,” 2012.
- [10] U. Y. Sociedad, V. V. Falcón, A. M. León, M. N. Cejas, C. Viviana, and B. Vaca, “Volumen 15 | número 4 | julio-agosto,” 2023.

- [11] C. V. Rodríguez, G. P. M. Ortega, and R. S. Ordosgoitia, “Implementación del proceso analítico jerárquico (ahp) para la toma de decisiones en la gestión de abastecimiento; aplicación a una empresa productora de queso costeño,” 2018.
- [12] B. Sanz, M. Sanz, R. Zapata, and M. Encinas, “Aplicación de técnicas ahp para la optimización de un modelo de evaluación de la gestión metrológica,” 2009.
- [13] S. T. Hurtado and G. Bruno, “El proceso de análisis jerárquico (ahp) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores,” 2005.
- [14] J. S. Bacalla, M. L. Caballero, and A. Calenzani, “Sistemas e informática modelo del proceso jerárquico analítico para optimizar la localización de una planta industrial.”
- [15] A. Almudena, C. Pérez, T. D. José, L. Ponz, T. D. Oscar, and H. B. Chocomeli, “Proyecto final de máster,” 2013.
- [16] Secom, “Iluminación en la industria química y en plantas petrolíferas,” 3 2022. [Online]. Available: <https://blog.secom.es/iluminacion-industria-petroquimica/>